



TITLE:

# 高電圧絶縁におけるボイド放電に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

加子, 泰彦

---

CITATION:

加子, 泰彦. 高電圧絶縁におけるボイド放電に関する研究. 京都大学, 1961, 工学博士

ISSUE DATE:

1961-12-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/161930>

RIGHT:

高電圧絶縁におけるボイド放電  
に関する研究

加 子 泰 彦

# 高電圧絶縁におけるボイド放電 に関する研究

昭和 36 年 4 月

加 子 泰 彦

DOC

1961

60

電気系

# 高電圧絶縁におけるボイド放電に関する研究

## 目 次

内容梗概	P. 1
序 論	5
才 1 部 固体絶縁材料のコロナ放電による劣化についての研究	7
1. 緒 言	7
2. コロナ劣化の一般的形態	9
2.1 目 的	9
2.2 実験法	10
2.3 実験による考察	14
2.4 総 括	24
3. 減少重量測定による均一消耗過程の検討	25
3.1 目 的	25
3.2 実験法	25
3.3 放電電力の測定	29
3.4 絶縁材料の表面抵抗とコロナ放電エネルギーとの関係	44
3.5 コロナ劣化の機構	58
3.6 酸化反応の諸形式	62
3.7 放電電力と消耗量との関係	67
3.8 乾燥剤の影響	70
3.9 酸素量とコロナ放電による酸化速度との関係	72
3.10 ボイド対向面の材質の影響	75
3.11 放電間隙長の影響	79
3.12 酸化防止剤の影響	82



## II

3.13 各種絶縁材料のコロナ放電による消耗特性 .....	83
3.14 総 括 .....	85
4. 発生ガス量測定によるコロナ酸化消耗特性の検討 .....	86
4.1 目 的 .....	86
4.2 実験法 .....	89
4.3 酸素中におけるコロナ放電劣化の実験による考察 .....	92
4.4 酸素-アルゴン混合気中の実験による考察 .....	110
4.5 総 括 .....	118
5. コロナ放電による均一消耗過程より局部的侵食孔進展 過程への移行条件についての検討 .....	119
5.1 目 的 .....	119
5.2 消耗特性と寿命との関係 .....	120
5.3 乾燥剤の影響 .....	122
5.4 空気中の湿度の影響 .....	125
5.5 コロナ放電による表面抵抗の変動 .....	143
5.6 コロナパルスの測定結果 .....	155
5.7 各種雰囲気中のコロナ放電による破壊までの寿命 .....	158
5.8 放電生成物の影響 .....	161
5.9 試料厚さの影響 .....	162
5.10 印加電圧の影響 .....	164
5.11 ボイド形状の影響 .....	174
5.12 総 括 .....	182
6. モデルコイルによる耐コロナ性の検討 .....	185
6.1 目 的 .....	185

6.2	ボイド孤立性の検討	185
6.3	シリコン処理の影響	188
6.4	総括	190
7.	実用絶縁物のコロナ劣化特性	190
7.1	目的	190
7.2	実験法	191
7.3	消耗特性	191
7.4	誘電特性の変化	194
7.5	絶縁耐力の変動	196
7.6	マイカと樹脂との重ね方についての考察	198
7.7	総括	204
8.	乾式高圧絶縁の耐コロナ性を改善する方法	205
9.	結言	207
オ2部 低ガス圧ケーブルの自己回復作用を中心とした		
	絶縁特性についての研究	211
1.	緒言	211
2.	絶縁油のコロナ放電による劣化特性	213
2.1	目的	213
2.2	供試絶縁油	215
2.3	実験法	215
2.4	実験による考察	218
2.5	総括	238
3.	低圧ならびに常圧ガスのモデルボイド, ならびに モデルケーブルによる自己回復作用の定性的検討	240

## IV

3.1	目 的	240
3.2	実験法	241
3.3	実験による考察	244
3.4	総 括	257
4.	ガス圧ゲージ1気圧下のモデル実験による自己回復作用の 定量的検討	258
4.1	目 的	258
4.2	コロナ放電による油浸紙の劣化特性	258
4.3	油浸紙間のボイド放電による自己回復作用	269
4.4	総 括	280
5.	中ガス圧下の自己回復作用の検討	282
5.1	目 的	282
5.2	実験による考察	282
5.3	総 括	285
6.	実用電力紙ケーブルによる自己回復作用の検討	285
6.1	目 的	285
6.2	実験法	286
6.3	実験による考察	288
6.4	総 括	303
7.	結 言	304
	結 論	307
	参考文献	310

## 内 容 梗 概

高電圧絶縁の劣化の原因としては、ボイド放電によるものが大きい。したがって、高電圧機器においてはボイドを極力なくすることが絶縁上の主要問題となつている。しかし、一般に使用中完全にボイド放電の起こらない構造とすることは経済的に不可能な場合が多く、実用上はボイド放電による劣化を避けるために、いわゆる耐コロナ性のすぐれた材質ならびに構造を選ぶことが必要である。一方またボイド放電は条件によつては自動的に消滅し、いわゆる自己回復作用といわれる現象の起こることがあり、この作用を積極的に利用することは、絶縁性能を改善する対策として実用上有効な手段である。

本研究はボイド放電が絶縁性能に及ぼす影響を明らかにせんとするものであつて、二部よりなる。

オ 1 部においては、発電機コイル等の乾式絶縁におけるコロナ劣化を対象とし、固体絶縁材料のコロナ劣化特性、ならびにコロナ劣化に対する材料組合せの効果等について検討した結果を述べている。

オ 1 章は緒言であつて、本研究の目的ならびに研究結果の概要を述べている。すなわち、コロナ劣化に関しては、すでに多くの研究者により種々研究結果が発表されており、個々の現象については、その機構ならびに形態等はかなり明らかとなつているが、それらの結果を総合して実用的に耐コロナ性を改善する対策を求めるにはまだ不十分の現状である。筆者はこれに対し、コロナ劣化の初期から絶縁破壊に至るまでの全過程について、個々の劣化形態ならびに機構等の関連を明らかにし、また各劣化過程のしめる実用的意味を明らかにして耐コロナ性を改善す

る方法の基本的な考え方を求め得たことを述べている。

オ2章では、ボイドコロナを対象として、まず最初にコロナ劣化の一般的形態について考察し、実用的な耐コロナ性に対しては、コロナによる材料の均一消耗の速度と、均一消耗から不均一局部消耗に移行する条件とが重要問題であることを確かめ、前者すなわちコロナ放電によつて起こる絶縁材料の消耗についての検討結果として、オ3章には減少重量を直接求めて、均一消耗時のコロナ劣化機構は一種の酸化が主体であることを確認した経過について述べ、オ4章にはコロナ酸化の厳密な特性を求めるため、発生ガス量を対象として酸素中のコロナ劣化について検討した結果を述べている。オ5章では後者の侵食形式の移行条件に対して、コロナ放電による発生水分ならびに雰囲気中の水分による表面抵抗の変動が重要であることを確かめ、オ6章には絶縁材料の試料による実験結果と実際の絶縁構造の特性との関連を求めるため、モデルコイルの実験を行なつた結果を述べ、オ7章では現在発電機コイル等に使用される実用複合絶縁物の長期劣化実験により、マイカ併用絶縁がすぐれていることを確認し、オ8章にはこれらの検討結果を総合し、乾式高圧絶縁の耐コロナ性を改善する対策についての考え方を述べている。オ9章は結言であつて、本研究によつて明らかとなつた事項を取りまとめて列挙している。

オ2部においては、低ガス圧ケーブルの自己回復作用の機構についての検討結果を述べている。

オ1章は緒言であつて本研究の目的ならびに概要を述べている。すなわち、低ガス圧ケーブルは、ケーブル絶縁事故の原因の大半をしめる鉛被事故の早期発見ならびに修理を可能とするため、ケーブル中の余剰

油を除去し、窒素ガスをゲージ1気圧に封入したものであり、その構造上ボイドが存在し、ボイド放電の開始する電圧（コロナ開始電圧）は使用電圧に接近している。しかし、このケーブルには使用中にコロナ開始電圧が次第に上昇する性質があり、この作用は低ガス圧ケーブルの発明者 G.B. Shanklin により自己回復作用 (Self-Healing Action) と名づけられている。しかし、その作用の機構については説明が不十分であつたために、実用的にこの性質をどの程度期待できるかという点で不安はまぬかれない状態であつた。筆者はこれに対し、その機構を明らかにし、その作用の実用的効果を定量的に明らかにすることができたことを述べている。オ2章では、ボイド放電が油浸紙絶縁に及ぼす基礎的な性質を明らかにするため、最初に絶縁油のコロナ劣化特性を検討し、現在一般に使用されるケーブル用絶縁油においては、コロナ放電による電氣的性能の低下には一定の限度があることを確かめ、オ3章では低圧下ならびに常圧下のモデルボイドならびにモデルケーブルによつて自己回復作用に対する定性的検討を行ない、ボイド放電による油の移動が自己回復作用の主原因であることを確かめている。オ4章には窒素ガス、ゲージ1気圧下のモデル実験により自己回復作用に対する定量的な検討結果を述べ、オ5章ではガス圧をさらに上昇した場合の特性を検討し、実用的に自己回復作用が期待できるのは低ガス圧時（ゲージ1気圧前後）に限られることを確認し、オ6章には、実ケーブルにより水平ならびに垂直布設状態の実負荷実験を行ない、自己回復作用の起こる原因としては、モデル実験で確認したようなボイド放電による油の移動と、熱膨張ならびに収縮と静電気力との複合作用による油の移動とがあげられることを確かめ、また適当な製法で製作された現行の低ガス圧

ケーブルはきわめて高い信頼度を有するケーブルであることを確認し、その詳細を述べている。オ7章は結言であつて、本研究によつて明らかとなつた事項をとりまとめ列挙している。これを要するに絶縁におけるコロナ劣化は、非常に広範囲にわたる複雑な問題であり、今後の検討をまつべき問題は非常に多いが、本研究により、いわゆる油中コロナ等の問題は別として、一般の絶縁構造中のボイド放電が絶縁性能に及ぼす影響の大要は明らかになつたものと考えられる。

## 序 論

電気機器において、絶縁技術の比較的容易な低電圧機器では、絶縁の重要度はそれほど大きくないが、電圧が上昇するとともに絶縁の重要度は飛躍的に増大し、遂には製作しうる機器の性能の限界は絶縁性能によつてきめられることとなる。このように絶縁技術は高電圧機器製作技術の重要部分となつてゐるが、絶縁を構成する材料には有機物が多いことも原因となり、他の部分に比して劣化による経年変化が大きく、簡単な計算等によつてすぐれた絶縁設計を行なうことは困難なものである。したがつて、この経年変化は絶縁に関する研究の主要問題となつてゐる。本研究は高電圧絶縁における絶縁性能の経年変化の主原因の一つであるボイド放電の影響について検討を行なつたものであり、その内容は乾式絶縁で重要問題となるコロナ劣化の問題、ならびに油浸紙絶縁でしかもボイドの存在を本質的にゆるしている低ガス圧ケーブルのボイド放電による性能変化を対象として研究を行なつたものである。すなわち、これらの問題については、いずれもすでに多くの研究が行なわれており、個々の現象についてはすぐれた研究報告もあるが、これを総合し、統一した概念を確立するには至つてゐないため、本研究において、まず前者のコロナ劣化の問題については、固体絶縁材料がコロナ放電により劣化する場合の初期から破壊に至るまでの全過程における個々の劣化過程の特性とその機構、ならびにその寿命に及ぼす影響を明らかにし、耐コロナ性のすぐれた絶縁をうる基本的方法について検討を行ない、また後者の低ガス圧ケーブルについては、自己回復作用の機構、ボイド放電とこの作用との関係、ならびにこの作用の実用的価値等を明らかにし、この



種ケーブルの設計基準を明らかにすることを目的として検討を行なったものである。

## 才 1 部 固体絶縁材料のコロナ放電による 劣化についての研究

### 1. 緒 言

電気機器に使用される絶縁材料は、長年月使用する間には遅速の差はあれ次才に劣化するのが普通である。この劣化の原因は多種多様であるが、その主なものとしては熱劣化とコロナ放電による劣化とをあげることができる。従来は絶縁劣化の主要問題は熱劣化であり、研究ももつぱらこの方面について行なわれていたが、近年化学工業の著しい発展によつてすぐれた合成絶縁材料が次々と出現し、耐熱性の問題はかなりの解決をみるに至つた。しかし、これらの合成材料は大部分が有機質であつて、耐コロナ性の点では必ずしもすぐれた性能を示さないものが多い。一方技術の進歩ならびに耐熱性の向上に伴ない、機器は高電圧となり、しかも寸法が縮少される傾向にあるため、コロナ放電による絶縁劣化の問題が近年特に重要視されるようになり、この方面の研究が各所で盛に行なわれている。

熱劣化に対しては、機器の発熱は避けられないので、耐熱性は絶縁に対する本質的な要求であるが、コロナ劣化に対しては、コロナ放電が起こらない構造とすれば問題は解決できるものであつて、このことは劣化防止対策としてもつとも重要なことである。この点を押し進めたものとしてはOFケーブル、油入変圧器ならびに油入コンデンサ等があり、これらにおいては使用電圧下で絶縁内部のコロナ放電は起こらない。しかし、回転機のように乾式絶縁の機器では、使用中に絶対にボイドの発生しないような絶縁方式は実際には得がたく、絶

縁の寿命を高めるためにはコロナ劣化の起こりにくい構造ならびに加工法を選ぶと同時に、耐コロナ性のすぐれた材料を使用することが必要である。

従来乾式絶縁における設計電界強度は低かつたために、コロナ劣化の研究は、古くは油浸紙絶縁に主力がおかれ、固体絶縁材料に関する研究は比較的新しいものである。この方面の研究は近年各所で行なわれているが、S.Whiteheadを中心とする英国のE.R.A.においてもつと多く研究が行なわれ、中でもJ.H.Masonの研究はその代表的なものである。本邦においても現在研究が盛であり、すでに電気学会において2回にわたりシンポジウムが開催されている。

コロナ劣化の現象は熱劣化に比して非常に複雑な現象であるが、これは放電自体が非常に複雑な特性を示し、厳密な意味での一定放電状態の実験を行なうことがきわめて困難であることに起因している。

このため電気学会放電専門委員会においては、コロナを定量化するの一の段階として、コロナ測定法の統一等について種々の実験ならびに検討を行ない、現在すでになりの成果が得られている。

コロナ放電を大別すると、電極縁端で起こる沿面コロナとボイドコロナとにわけられ、放電の本質としては同じものであるが実用上は異なつた特性を示し、また異なつた対策が必要である。たとえば沿面コロナに対しては電極端部の加工によりコロナ防止を行ない、コロナ劣化を著しく軽減することができる。<sup>(1)</sup> 本研究はボイドコロナを対象として実験ならびに検討を行なつたものである。

コロナ劣化に関する実験法は試料の変質等を検討するための非破壊実験法と、絶縁破壊が起こるまでの寿命を求める実験法とに大別され

るが、前者のみによつては直接的な寿命に関連する結果が得にくいため、この方法によつては従来定性的な検討が行なわれたのみで、コロナ劣化機構の検討は不十分であつた。一方、寿命特性よりの検討は近年特に多くの研究者によつて行なわれ、有用な結果も数多く得られているが、まだ統一した結論をうるに至っていない現状である。

筆者はこれに対して、非破壊実験ならびに破壊寿命実験を併用して検討し、コロナ劣化の各過程における劣化機構を解明し、また各過程について従来明らかにされている機構に対し、実用的な見地から相互の関連を明らかにし、すぐれた耐コロナ性を有する実用絶縁構造をうる基本的な考え方を確立することができたので、ここにその研究結果を述べるものである。

## 2. コロナ劣化の一般的形態<sup>(2)(3)</sup>

### 2.1 目 的

コロナ劣化に関する研究報告は種々あるが、それらはそれぞれ異なつた実験法を採用しており、したがつて、研究対象としている劣化の形態も異なつており、相互の関連を求めることは困難な場合が多い。ここでコロナ劣化の一般的形態を明らかにするために、実際の機器において経験されているコロナ劣化の形態について考えてみると、大別して二つのものがあり、その一つはコロナ放電による絶縁材料の気化消耗である。すなわち、たとえばマイカと樹脂とを併用する発電機コイルの絶縁において20~30年経過したものの中には、局部的ではあるがマイカ間の樹脂がほとんど消失し、灰分とみなしうる粉末のみ残存する状態となつ

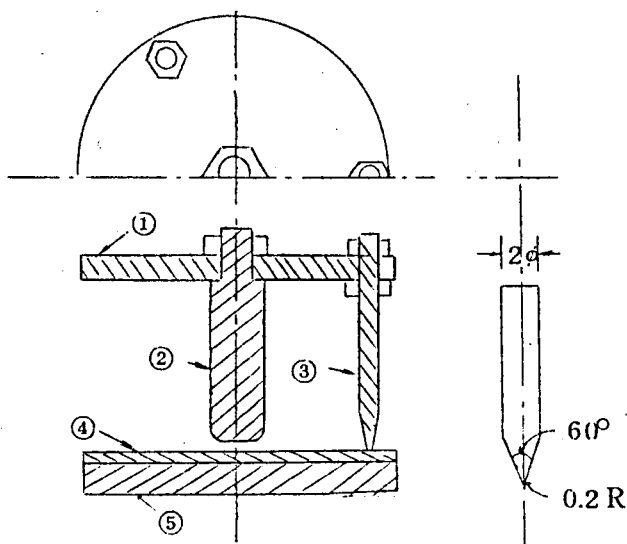
ているものがある。このほかまた、マイラで絶縁したコイル等でコロナ劣化により絶縁破壊が起こつたときには、コイルの角の部分等のコロナ放電の起こりやすい個所では、外層はかなりの厚さまで絶縁材料の消耗が起こっていることが観察される。オ二のものとしては、たとえばポリエチレンケーブル等で過電圧が印加された場合、いわゆる“treeing”とよばれる樹枝状放電路が絶縁内部に細く長くのびることが知られている。<sup>(4)~(9)</sup> このように見かけ上劣化形態が異なるために、研究者により樹枝状放電路の発生ならびに成長を主体としたもの<sup>(5)(6)</sup>、あるいはまた侵食により厚さが薄くなることを対象として研究を行なっているものがある。<sup>(10)</sup>

コロナ劣化の機構を解明し実用的な対策を考えるためには、この両者の関連ならびに実用的な意味を明らかにすることが必要であり、本章においてはこれらについての検討結果を述べる。

## 2.2 実験法

### 2.2.1 電極装置

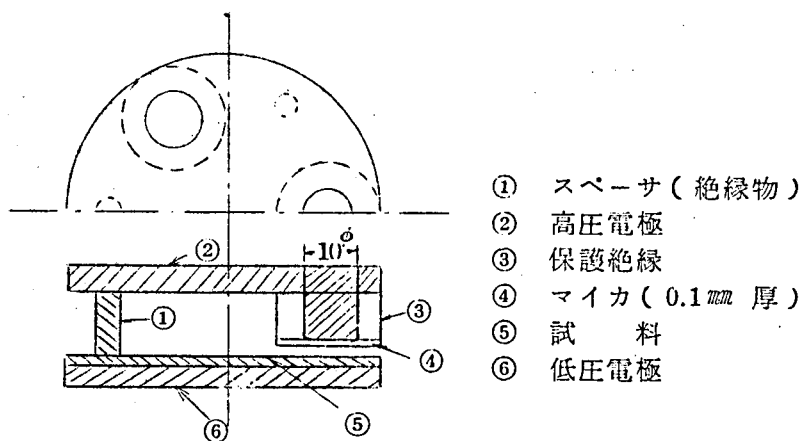
実験に使用した電極装置は図1.2.1 ならびに図1.2.2 に示すものであり、回路は図1.2.3 に示すものである。図1.2.2 のものは絶縁物間のボイドに対応するものであるが、上部電極にはり付けされたマイカのために全路破壊は起こらない。しかし、下部電極上の試料に侵食孔が貫通すると放電状態が著しく変化し、外部より変化を容易に検知することができる。すなわち侵食孔の貫通により急に放電エネルギー密度の大きい発光柱が生ずる。



(a) 平等電界放電電極 (b) 不平等電界放電電極

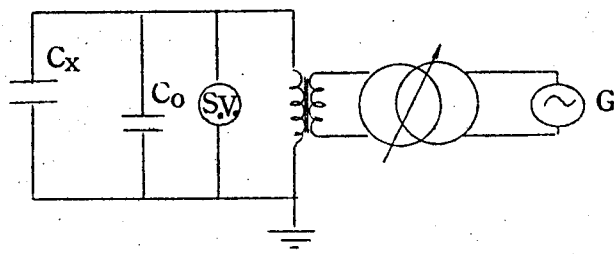
- ① フェノールレジン積層板
- ② 高圧電極（不銹鋼， $10\text{mm}\phi$ ）
- ③ 間隙調節棒（絶縁物）
- ④ 試料
- ⑤ 低圧電極

図 1.2.1. コロナ劣化実験用電極装置



- ① スペーサ（絶縁物）
- ② 高圧電極
- ③ 保護絶縁
- ④ マイカ（ $0.1\text{mm}$  厚）
- ⑤ 試料
- ⑥ 低圧電極

図 1.2.2 マイカにて全路破壊を阻止したコロナ劣化実験用電極装置



$C_x$  : コロナ劣化実験用電極装置

$C_o$  : コンデンサ (300 pF)

G : 1.5kc 発電機

S.V. : 静電電圧計

図 1.2.3. コロナ劣化実験回路

実験容器については次章に詳述するが、 $140\text{mm}\phi \times 170\text{mm h}$  のガラス筒を使用した密閉できる構造のものである。図 1.2.1. の電極装置を使用する場合には、容器ごと恒温槽に入れて温度調節を行なったが、図 1.2.2. のものでは放電の全電力が大きく、したがって放電による発熱も大きいため、図に示した構成のまゝ、別に油を内部に循環することにより定温に保った金属円筒の間に挿入し、電極自体の温度調節を行なった。実験は常圧の乾燥空気中で行ない、その場合の温度は 50, 70 ならびに 80℃である。なお、空気の乾燥は容器内にシリカゲルを封入することによつて行ない、また試料と電極との接着にはシリコングリースを使用した。

## 2.2.2 電 源

劣化実験は一般に長時間を要するものであり、なんらかの方法で劣化を加速することが必要である。厳密な意味では

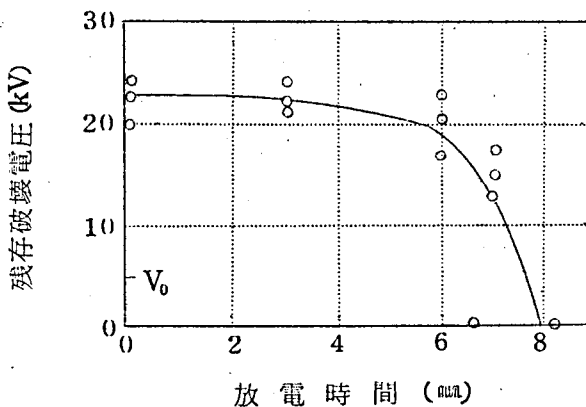
コロナ劣化に限らずすべての加速実験は実際と等価となることはあり得ないが、加速実験の条件としては実際とできるだけ等価であることが必要である。コロナ劣化を加速させるには通常印加電圧を大きくするか、あるいはまた電圧の周波数を大きくすることが考えられる。<sup>(4)(5)(6)(8)(11)</sup> 前者によつては有効に加速できるのは数倍程度であり、それ以上電圧を上げれば破壊が容易に起こるようになり、等価であるという条件が満足されなくなる。これに対し周波数を上げるとは非常に有効であり、一般にこの方法が採用されている。すなわち、1 サイクル中に起こるコロナ放電の回数は等しくなるので周波数の比だけ加速されることになる。使用される周波数の上限は通常熱破壊との関連によつて決まり、材料の誘電特性ならびに条件等によつて異なるが、たとえばポリエチレンでは900kc まで等価条件が成立し、<sup>(8)</sup> その他の材料でも印加電圧が大きくなく、温度の変動がそれほど起こらない場合には数倍程度まで等価の関係が成立することが報告されている。<sup>(4)(12)</sup> しかし、後章にも述べるが、コロナ劣化は複雑な条件で変化し、たとえば放電部のガス組成の変化等が起こるため、実際の絶縁構造におけるコロナ劣化機構を詳細に検討するためには使用しうる周波数は比較的強く制限される場合が多い。本実験ではそれらの点も考慮し、1.5kc の高周波発電機を電源として使用した。なお通常の高圧絶縁においては、コロナ劣化を考慮して設計電界強度を比較的強くとっているため、本実験は電界強度の点でも実際の場合よりか



なり大きくなっている。

### 2.3 実験による考察

コロナ劣化によつては、最終的には絶縁破壊が起こる。したがつて、実用的にはコロナ放電により絶縁破壊が起こるまでの時間を求めるのがより直接的であるが、その方法によつてはコロナ侵食の進展速度等を求めることは困難である。ここでは一定時間、すなわち一定量のコロナ放電を受けた後の試料の残存破壊電圧の検討を行なつた。試料としてはマイラ(ポリエチレンタレート)およびポリエチレンを使用し、代表的な実験結果を図1.2.4～図1.2.6 に示した。ここにマイラならびにポリエチレンを選んだのは、材質の分子構造が明らかであり普遍性のある結果の得やすいこと、入手が容易であり

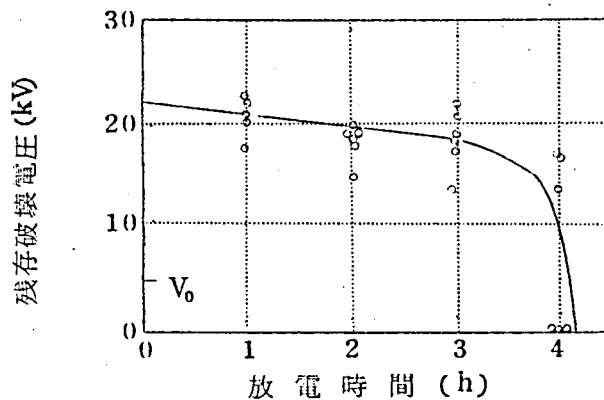


$V_0$  : 印加電圧

図 1.2.4 放電時間と残存破壊電圧との関係

注) 実験条件 電 極 : 図1.2.1 (b)  
 間隙長 : 1 mm  
 試 料 : マイラ (0.076mm厚)  
 雰囲気 : 乾燥空気 (シリカゲル入)  
 温 度 : 80 °C  
 電 圧 : 4kV, 1.5 kc

特に適当な厚さのシートが得やすいこと、マイラにおいては特に厚さの均一性が良好であること、ならびに化学的に安定であつて取扱いが容易であること等の理由によるものである。実験結果の顕著な特徴としては、最初はほとんど破壊電圧の低下は起こらないが、ある放電量に達すると急速に低下していることである。図 1.2.4. の場合には針状電極であり、見かけ上固定点に放電が起こっている<sup>(3)</sup>にもかゝらず、このような特性を示し、図 1.2.4 ~ 図 1.2.6. の特性は一般的形態と考えられる。なお実験結果のばらつきはかなり大きい、これは試料の厚さの不均一によるところは少なく、試料の表面状態ならびに組成等のミクロ的な不整によるところが大きいものと考えられる。

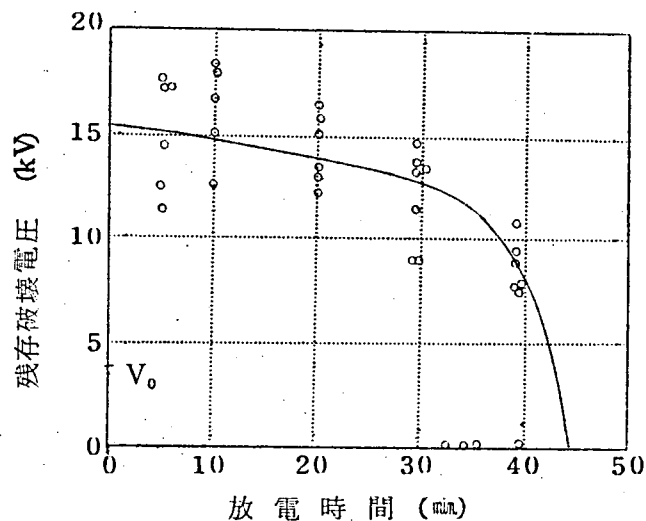


$V_0$  : 印加電圧

図 1.2.5. 放電時間と残存破壊電圧との関係

注) 実験条件

電 極	: 図 1.2.2
間隙長	: 1 mm
試 料	: マイラ (0.076 mm 厚)
雰囲気	: 乾燥空気 (シリカゲル入)
温 度	: 50 °C
電 圧	: 4kV, 15kc



$V_0$  : 印加電圧

図 1.2.6. 放電時間と残存破壊電圧との関係

注) 実験条件    電 極 : 図 1.2.1(a)  
                   間隙長 : 0.2 mm  
                   試 料 : ポリエチレン (0.07 mm 厚)  
                   雰囲気 : 乾燥空気 (シリカゲル入)  
                   電 圧 : 4 kV · 1.5 kc  
                   温 度 : 70°C

ここで破壊電圧の信頼度が問題であるが、破壊試験に際しては劣化後の試料面にコロイド黒鉛水溶液を塗布乾燥し、これを電極として試料との接触を完全とし、また緑端の影響に対しては、電極を試料の健全部までのばし、さらにまたアセトン-キシレン混合液中で実験することによつて電極端における破壊を防止しているため、絶縁材料自体の破壊電圧が得られているものと考えられる。次にまた、試料厚さが薄くなつた場合に破壊電界強度が大きくなることも考えられるが、コロナ放電をうけない試料について、同様な方法によつて 0.076 mm ならびに 0.038 mm 厚さのマイラの破壊

電圧を求めると、前者は後者の約2倍の値となり、このことから本実験の範囲では、コロナ放電によつて厚さが薄くなれば破壊電圧は比例的に低下し、また侵食孔が細いものであれば残存平均厚さから推定される値以上に低下するものと考えられる。

以上の実験結果ならびに後章で述べる実験結果を総合し、コロナ侵食の進行速度をモデル的に示せば図1.2.7. のようになる。

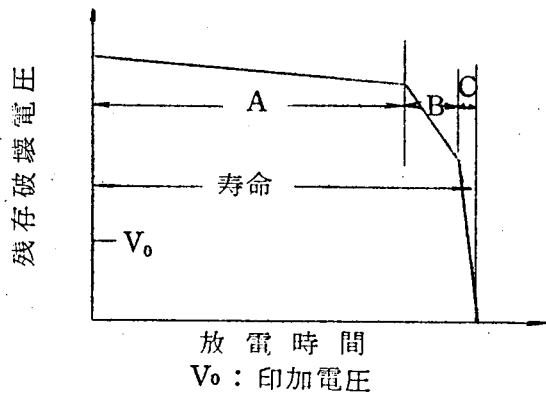


図 1.2.7 コロナ侵食速度のモデル的考え方

図においてA区間は放電により試料表面からの均一な気化消耗、あるいは粉末状となつて飛散することにより試料が薄くなつてゆく段階であり、表面は一様であつて特定の弱点は生じていないため破壊電圧は厚さの変動に対応して減少している。このような過程を経てコロナ劣化が進行すると表面は次第にざらざらになってくる。すなわち、放電は本来均一なものではなく、試料の消耗量が多くなるにつれて消耗の不均一が拡大されてくるものである。このようにして表面に局部的な凹みが生ずると内部では放電エネルギー密度の増大が起<sup>(5)(6)</sup>こり、その部分の消耗がますます強調され侵食孔としてのび始めるに至る。この段階を図にはB区間とし

て示してある。侵食孔がさらにのびると先端の電界強度はますます大きくなり、遂には材質の本質的(intrinsic)な強度に達すると、急速に破壊に至るものであり、これをC区間として示した。実際の場合にはもちろんA、BならびにC区間の境界は明確ではない。実際に観察される侵食孔は非常に細く、B過程の後半以後では $1/100$ mm $\phi$ あるいはそれ以下である。したがって、残存厚さから考えられる平均電界強度がそれほど大きくならないうちに、侵食孔の先端の電界強度が非常に大きくなることは容易に考えられることである。このようにコロナ劣化の一般的形態としては、A、B、C、3過程にわけられるが、実用的に重要なことは寿命中に占める時間的割合はA過程が大部分であることである。したがって、耐コロナ性として重要な特性はA部の傾斜、すなわち均一消耗の速度と、次にはAからBへの移行条件とである。すなわち、均一消耗がどの程度起こつたときにBへ移行するかにより寿命が大きく変動する。したがって、以下に述べる研究においてもこの両者について検討を行なつたものである。

コロナ劣化の一般的形態は上述の通りであるが、各過程の時間的割合についてはコロナ放電をうけるときの諸条件により異なることは当然である。たとえば後章にも示すが、最初から放電の集中しやすいきず等があれば当然A過程は短くなるし、また厚い絶縁で不平等電界であり、かつ印加電圧がそれほど大きくない場合には、細い樹枝状侵食孔がのびてもその先端の放電エネルギー密度はそれほど大きくならず、したがってまた侵食孔のインピーダンスも大きくなつて<sup>(6)</sup>電界集中も起こりにくく、またたとえ大

きな電界強度に達しても先端近くの絶縁材料内部に空間電荷が形成されて電界緩和の働きをする等のことが起こり、<sup>(14)</sup> B区間が比較的長くなる場合がある。<sup>(7)</sup> このような現象があるため、コロナ劣化を検討する場合には使用条件との関連を検討する必要がある。

しかし、一般的に時間的割合をとればAの占める時間がもつとも大きいものである。

B区間、すなわちコロナ侵食孔がのびることに対してはすでに種々のすぐれた研究結果が報告されており、<sup>(5)(6)</sup> 孔の内部のエネルギー密度ならびに先端の電界強度の計算式も示されているが、ここでは簡単に定性的にその機構について述べる。

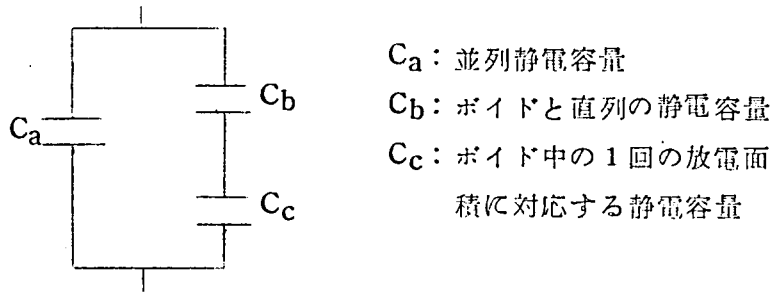


図 1.2.8 ボイド放電の等価回路

ボイド放電が起こる場合の等価回路を図1.2.8. に示すように考えると、ボイド Cc において1回の放電によつて発生するエネルギーは(1.2.1) 式によつて与えられる。

$$W = \frac{1}{2} \left( \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} + C_c \right) \{ u^2 - (u - \Delta v)^2 \} \quad (1.2.1)$$

ここに、 $u$  は  $C_c$  の放電電圧であり、 $\Delta v$  は放電による  $C_c$  の電圧降下である。一般に  $C_a \gg C_b, C_c$  ならびに  $\Delta v \cong u$  の関係が成立するため、(1.2.1) 式は近似的に (1.2.2) 式に変換される。

$$W = \frac{1}{2} (C_b + C_c) u^2 \quad \dots\dots\dots (1.2.2)$$

コロナ侵食孔の進展と、コロナエネルギーとの関係を求めるために図1.2.9. に示すような電極構成を考える。すなわち電極間距離は一定に保ち、絶縁材料の厚さを変えてボイド厚さを変えるものである。なお印加電圧は十分大きく、1 サイクル中の放電

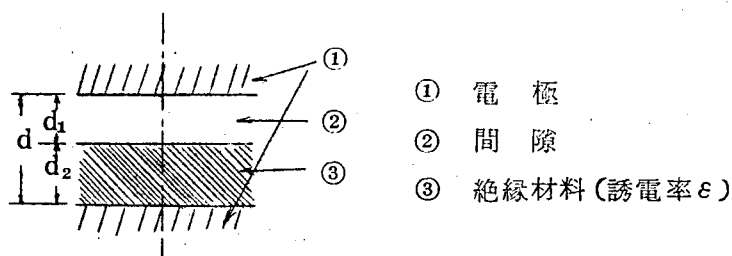


図 1.2.9 電 極 構 成

回数はかなり多いものとする。ここに図1.2.8. の  $C_a$  に相当する部分は示していないが、そのような静電容量は存在するものとし、(1.2.2) 式が成立するものとする。放電電圧は間隙長に比例するものと仮定すると、放電間隙長と1回の放電のエネルギー、単位時間中の放電回数、ならびに単位時間に発生する放電のエネルギーとの関係は図1.2.10のようになる。ただし、ここで1回の放電の面積は不変であるとしている。図において絶縁材料の誘

電率が大きくなるほど1回の放電のエネルギー増加率は大きくなっているが、一方放電回数は誘電率が大きい場合に間隙長とともに減少する傾向があり、単位時間中のコロナ放電のエネルギーと間隙長との関係は、誘電率の差異により平行移動したような特性となる。しかし、ともあれ単位時間中のエネルギーも間隙長増大とともに急増し、コロナ劣化の場合に局部的に侵食孔が生じ、その部分の間隙長が大きくなればますますその部分にエネルギー集中が起こり、侵食孔が進展するものと推定される。

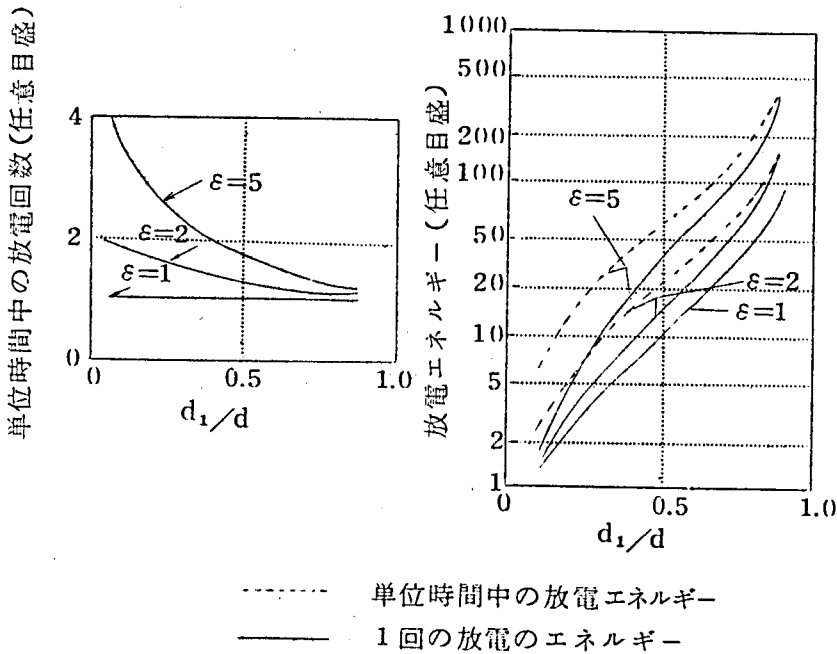


図 1.2.10 試料厚さと放電回数ならびに放電エネルギーとの関係

上述の計算法では侵食孔の径の大小の影響を考えなかったが、実際には径が小さい場合エネルギー集中がいつそう大きくなる。すなわち、(1.2.2)式より明らかなように、ボイド放電のエネルギーは、放電によりボイド内面に堆積された電荷量と放電電圧と



の積の $\frac{1}{2}$ に等しくなる。放電のエネルギーは放電空間中で熱その他に変換される分も多いが、簡単のためにボイド内面に全部が与えられるものと仮定すると、ボイド内面の放電のエネルギー密度  $w$  は (1.2.3) 式で表わされる。<sup>(4)</sup>

$$w = \frac{1}{4} \sigma u \quad \text{..... (1.2.3)}$$

ここに、 $\sigma$  はボイド内面の電荷密度である。図 1.2.11 に示すように、ボイド内面の一部に回転楕円体の形状をもつ小侵食孔が生じたとすると、先端 A 点における電荷密度は A 点の絶縁材料内方向の電界強度に比例するため、比較的簡単に計算することができる。ここに小侵食孔の短い間は  $u$  の増大はわずかであるため、エネルギー密度は  $\sigma$  によつて大勢が決まることになる。

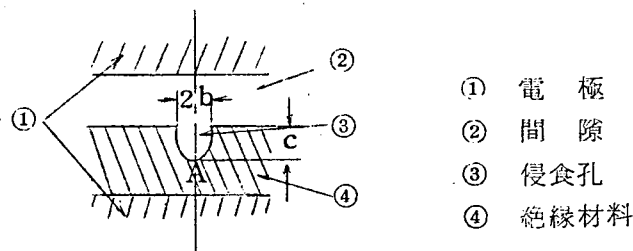


図 1.2.11 コロナ侵食孔のモデル

A 点の電界強度の計算法はすでに J. H. Mason ら<sup>(6)</sup>により詳細に検討されているが、一例として小侵食孔の長さが絶縁材料厚さに比してかなり小さい場合の計算式を示すと (1.2.4) 式のようになる。

$$E = E_0 \frac{c^2/b^2}{\ell_n 2c/b - 1} \quad \text{..... (1.2.4)}$$

ここに、 $E$ はA点における電界強度であり、 $E_0$ は侵食孔が存在しない場合の電界強度である。 $E/E_0$ と $c/b$ との関係を図示すると図1.2.12のようになり、侵食孔の長さ $c$ を一定とすると、径 $b$ の小さいほどA点の電界強度が大きくなり、したがって1回のコロナ放電エネルギーの表面密度が大きくなることがわかる。

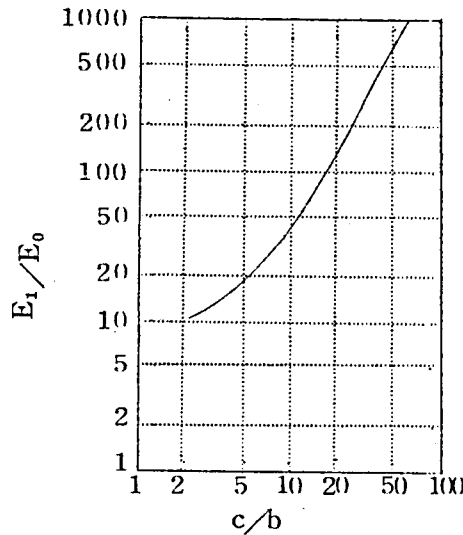


図 1.2.12 コロナ侵食孔の形状と先端の電界強度との関係

図1.2.10ならびに図1.2.12より、コロナ侵食は一度侵食孔としてのび始めると径の小さい侵食孔となつて、その進展速度は加速的に大きくなることがわかる。しかし、実際の場合には、侵食孔の進展は上記の計算法で示したよりもかなりおそくなるのが普通である。すなわち、すでに述べたように、侵食孔のインピーダンスも大きくなつて先端の電界強度が緩和されること、放電のエネルギーは絶縁材料の表面のみに与えられず、放電空間で消費される分が大きく、特に細い侵食孔中では側面に与えられる割合が大き

くなること、ならびに放電はボイド内で同時に均一に起こるものでないため、侵食孔の内部への電荷の供給は、周辺への放電時に沿面放電等によつて行なわれる分も多く、エネルギーがすべて侵食に関係するものとならないこと、あるいはまた侵食孔内面が導電化し、先端で放電が起こらなくなること等により侵食孔の急速な進展が阻止されることになる。また実際の機器絶縁等において、設計電界強度が小さい場合にはある程度のコロナ侵食が起こると放電が停止することがある。すなわち、図1.2.10における放電回数は、相対値としては放電が起こらない場合のボイド内の電界強度と比例するものであり、放電間隙長が小さいとき印加電圧がコロナ開始電圧よりわずかに大きいのみである場合には、間隙長の増大とともにボイド内の電界強度が減少し、放電停止が起こる場合もある。古い発電機コイルの絶縁において、コロナ侵食劣化が局部的にかなり起こっているにもかかわらず、絶縁破壊が容易に起こらないことが多いが、それには途中で放電が停止したことも有力な原因と考えられる。

## 2.4 総括

以上述べたように、コロナ劣化の一般的形態としては材料の均一消耗とそれに続く局部的侵食孔の発生とに大別され、A, B, Cの3過程が存在し、時間的にはA過程すなわち均一消耗の過程が寿命中の大部分を占めることが判明し、一見無関係にみえる両過程を統一して考えることができるようになった。次章以下にはこの各過程の機構についての検討結果を述べる。

### 3. 減少重量測定による均一消耗過程の検討<sup>(3)(15)(16)</sup>

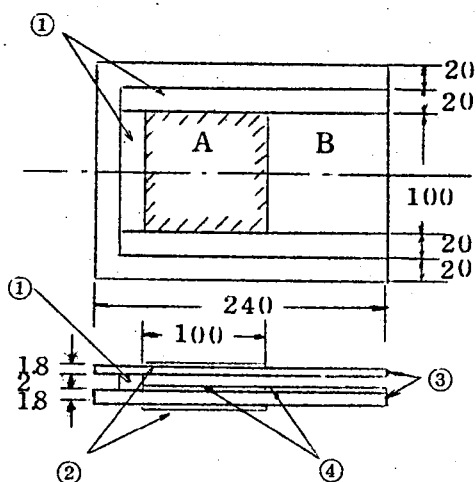
#### 3.1 目 的

前章にも述べたように、コロナ劣化の初期においては絶縁材料の均一な消耗が起こり、また時間的には全過程中この過程の占める割合が大きい。特に実際の機器の乾式高圧絶縁においては、油浸絶縁に比して設計電界強度は小さいので、局部的侵食孔がのび始める前にはかなりの量の消耗が起こる。したがって、コロナ放電による消耗の特性は比較的低電界のコロナ放電による絶縁劣化を検討する上には特に重要である。本章には均一消耗過程を対象としてコロナ劣化機構についての検討結果を述べる。

#### 3.2 実験法

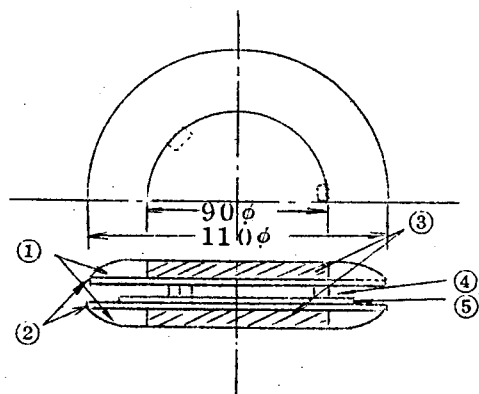
##### 3.2.1 コロナ劣化実験用セル

コロナ劣化に対する非破壊実験法の代表的なものはフランスの委員より I.E.C. に提案された方法<sup>(17)(18)</sup>であり、これには図 1.3.1. のようなセルを使用する。試料の内 A の部分は放電の影響を直接うけるものであり、B の部分は放電によって生じた気体生成物の影響を検討するためのものである。実験を定量的に行なうためには絶縁材料の劣化と関係のない電極端部等の放電が起こらないようにする必要があり、本実験においては図 1.3.2. に示すものを使用した。セルの絶縁隔壁の材質としては安定な無機質たとえばガラス等がすぐれているが、この場合ガラスは誘電損失が大きく、放電電力のみを正確に分離して測定することは困難である。したがって、比較的短時間の実験では誘電特性のすぐれた有機材料を



- ① スペーサ ( ガラス板, 2 mm 厚 )
- ② 電 極 ( 100 × 100 mm )
- ③ ガラス板
- ④ 試 料

図 1.3.1 コロナ劣化実験用セル (I.E.C.法)



- ① 保護絶縁
- ② 絶縁隔壁
- ③ 電 極
- ④ スペーサ ( 3 × 10 mm, 3 ~ 4 個 )
- ⑤ 試 料

図 1.3.2 改良型コロナ劣化実験用セル

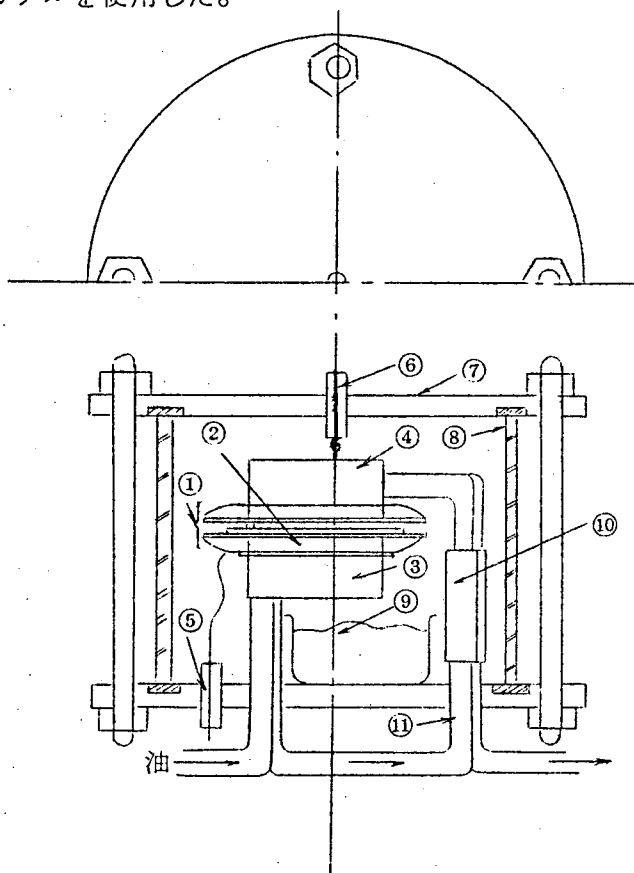
使用し、また厚い試料では試料自体を直接電極に接着する方法をとつた。またセルに有機材料を使用し、しかもその材料が直接放電をうける実験法においては、セル自体のコロナ放電による劣化消耗を防止するため、表面に耐コロナ性のすぐれたシリコンワニスの焼付け、あるいはマイカの薄片などをはり付ける方法により比較的長時間の実験を安定に行なうことができる。しかし、これらは試料の誘電特性がすぐれている場合に適用される方法であつて、試料の特性がガラスと同程度であれば、絶縁隔壁としてガラスを使用することが便利であり、かつすぐれている。

試料をセル内に入れる場合には、セルの片側に完全に接着することが必要である。試料の両面で放電をうける場合には劣化機構の変化も起こりうるし、また加速実験では放電電力が比較的大きく、これが大部分熱に変換されて熱流は電極方向に流れる。したがつて、熱抵抗の大きいガス層があればその間に大きな温度差を生じ、試料は高温となつてコロナ劣化が加速され、また熱劣化も起こる。二三の予備実験の結果では、電極の温度調節が不十分であつたことも関連し、常温の実験で百数十度の熱劣化に対応する劣化が起こる場合があることを経験している。

### 3.2.2 実験容器

前項にも述べたように、加速実験では発熱量が大きいので（本実験では10~30W）単にセルを空気恒温槽中に入れるなどの方法によつて温度調節を行なうことは不可能である。

このため図1.3.3. に示すように電極に接する金属円筒に油を流す構造とし、この油の温度調節を行なつた。 また後述するように、コロナ劣化に対してはガスの組成の影響が大きいので密閉できる構造とした。 特に湿度の影響は微妙であり、<sup>(19)(20)(21)</sup>実験は主として乾燥空気中にて行ない、乾燥剤としてはシリカゲルを使用した。



- |              |                        |
|--------------|------------------------|
| ① セル         | ⑦ フェノールレジン積層板          |
| ② 主電極        | ⑧ ガラス筒 (150mmφ×170mmh) |
| ③ ガード電極 (銅製) | ⑨ 乾燥剤 (シリカゲル)          |
| ④ 高圧電極 (銅製)  | ⑩ P.V.C.管 (絶縁用)        |
| ⑤ 主電極端子      | ⑪ 油流用銅管                |
| ⑥ 高圧電極端子     |                        |

図 1.3.3 コロナ劣化実験用装置

### 3.3 放電電力の測定

非破壊実験において、たとえば材料の減少重量により、各材質の比較を行なう場合には、特殊な材料を除き、一般の有機材料では特に大きな差異がなく、その順序も実験条件のわずかの差異によつて逆転した結果が得られることをしばしば経験している。したがつて、減少重量によつてコロナ放電による劣化の機構を説明するためには、実験法をより厳密なものにすることが必要である。

放電の量を測定するためにコロナパルスの放電電荷量を測定することが行なわれ、<sup>(22)</sup> この測定法を統一することに関しては電気学会の放電専門委員会において検討が進められ、かなりの成果が得られている。<sup>(23)</sup> 非破壊実験においては、その性質上ある程度の大きさの試料について実験を行なう必要があり、放電の量としてはまずオーに放電の全電力を測定することが必要である。放電電力の測定については種々の方法が提案されているが、<sup>(24)(25)</sup> そのおののについてみると精度の点で問題があり完全なものではない。測定法については種々検討の結果、一応満足すべきものを求め得たので、ここでは各種測定法と比較して述べる。

#### 3.3.1 平均放電エネルギーを求める計算式

ボイド放電は個々の放電パルスの集合であり、放電エネルギーを求めるにも厳密には低周波から高周波にわたる現象の解析が必要であるが、その平均的なエネルギーについては電源から供給する電力から求められる。計算法についてはすでに種々の報告があるが、<sup>(24)(25)(26)</sup> ここではそれらを取りまとめ



て示す。

まずボイドを電界と直角方向に広がる平行な間隙とし、等価回路として図 1.3.4. のものを考える。印加電圧を  $V_m \sin \omega t$  とすると、ボイドには  $k_1 V_m \sin \omega t$  の電圧が印加される。

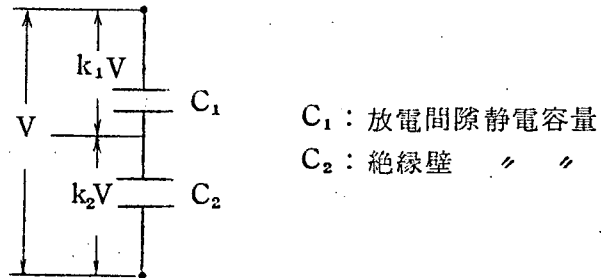


図 1.3.4 コロナ劣化実験用セルの等価回路

ボイドの放電電圧を  $V_s$  とすると、 $k_1 V_m > V_s$  でボイド放電が開始されるが、この場合個々のパルスについては考えず、放電区間ではボイドは一定電圧  $V_s$  に保たれるものとする。この場合電圧ならびに電流波形は図 1.3.5. に示すようになる。

図より明らかなように、放電開始位相  $\theta_1$  は (1.3.1) 式で表わされる。

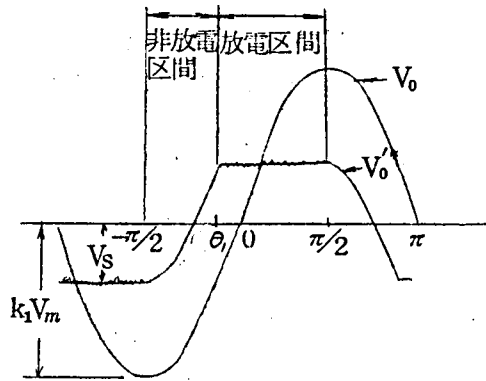
$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \frac{2V_s}{k_1 V_m} - 1 \right) \quad (1.3.1)$$

また電流は (1.3.2) 式ならびに (1.3.3) 式に示す値となる。

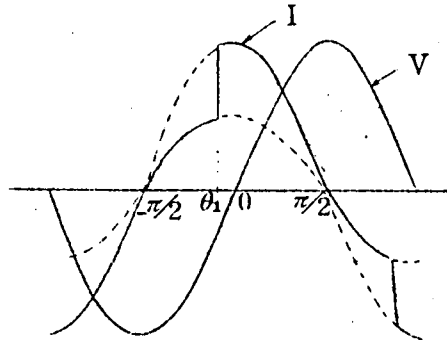
$$\text{非放電区間 } -\pi/2 \sim \theta_1 \quad I_0 = C_0 \omega V_m \cos \theta \quad (1.3.2)$$

$$\text{放電区間 } \theta_1 \sim \pi/2 \quad I_1 = C_2 \omega V_m \cos \theta \quad (1.3.3)$$

ここに、 $C_0$  は非放電時の静電容量であり、放電間隙部とセル壁部との直列静電容量  $\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  である。



(a) 電 圧



(b) 電 流

- $V$  : 印加電圧  
 $I$  : 電 流  
 $V_0$  : ボイドで放電が起こらない場合のボイド分担電圧  
 $V'_0$  :       "       "       起こる場合の       "       "  
 $\theta_1$  : 放電開始位相

図 1.3.5 放電時の電圧電流波形

放電電力は電圧と電流との積の平均値であり、(1.3.4)式で表わされる。

$$W = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi/2}^{\theta_1} \omega C_0 V_m^2 \sin \theta \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\pi/2} \omega C_2 V_m^2 \sin \theta \cos \theta d\theta \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{4} (1 + \cos 2\theta_1) \omega V_m^2 (C_2 - C_0) \quad (1.3.4)$$

(1.3.1) 式の関係より式を若干変形すると(1.3.5)式が得られ、これは T.C.Manley の求めた式<sup>(24)</sup>と一致する。

$$W = 4 f V_S C_2 \left( V_m - \frac{C_1}{C_0} V_S \right) \quad (1.3.5)$$

(1.3.4) 式をみると、(1.3.2)(1.3.3)式で表わされる電流をフーリエ級数に展開し、その基本波成分のみとつて電圧と同相分電流と電圧との積を求める式と一致している。すなわち、このことからブリッジ法などにより基本波成分についての回路の力率ならびに等価静電容量を求めて放電電力を求めうることがわかる。さらに簡単に考えれば、電流波形は放電時には複雑となるが、印加電圧が正弦波であれば高調波電力は零となり、当然基本波成分のみについて計算すればよいことがわかる。

### 3.3.2 ブラウン管オシロスコープによる電力の測定

T.C.Manley<sup>(24)</sup>が述べているように、図 1.3.6. の回路により図 1.3.7. の図形が得られる。平行四辺形が得られることは、前項で述べたように電流が放電区間ならびに非放電区間

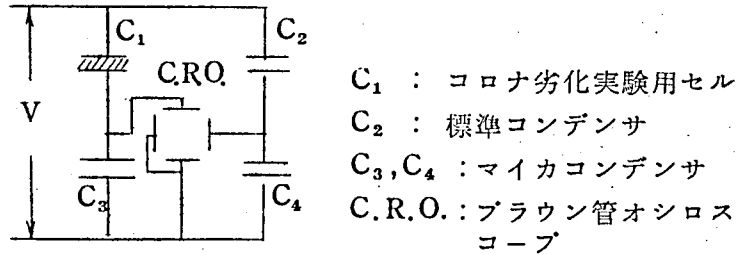


図 1.3.6 ブラウン管電力図形測定回路

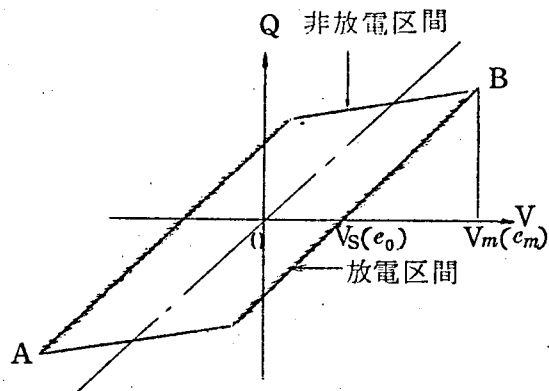


図 1.3.7 電力図形

においてそれぞれ振幅の異なる正弦波の組合わせであり、各  
区間で電流と電圧との位相差が  $90^\circ$  であることを示しており、  
図 1.3.5. の電流と電圧との関係を実験的に確かめるものであ  
る。図形は横軸が電圧，縦軸が電荷を表わし，各辺の傾斜  
はそれぞれ放電時ならびに非放電時の静電容量を表わすもの  
である。平行四辺形の面積を計算すれば，(1.3.6) 式のよ  
うになる。

$$S = 4 C_2 e_0 (e_m - \frac{C_1}{C_0} e_0) \quad (1.3.6)$$

面積は1サイクル毎のエネルギーを表わすため放電電荷は(1.3.7)式より  
になる

$$W = f S = 4 f C_2 e_0 (e_m - \frac{C_1}{C_0} e_0) \quad (1.3.7)$$

(1.3.5)式と(1.3.7)式とを比較すると当然  $e_m = V_m$  であり、  
 $e_0 = V_s$  となる。すなわち、 $e_0$  はボイドの放電電圧を表  
わすこととなり、この測定法はボイドの放電電圧を測定する  
方法でもある。<sup>(27)</sup>

後述するように、放電の量としては放電電力のみならず、  
放電電流を測定することが必要な場合もあるが、放電電流と  
して回路に入れた電流計で測定した値をとることは不適當で  
ある。すなわち、その場合の電流には、放電電流とは関係  
のない変位電流、あるいはまた高周波振動電流が含まれてい  
る。ここで放電電力を考えてみると、(1.3.8)式が成立す  
るはずである。

$$W = V_s I_s \text{ ..... (1.3.8)}$$

ここに、 $I_s$  は放電電流である。

$W$ は後述するようにブリッジ法によつて正確に測定され、  
 $V_s$  は上述のように電力図形から求められ、ボイドが平行間  
隙の場合には一定値となるため放電電流は簡単に求められる。  
ただし、この場合  $V_s$  の測定精度はそれほど高くないので、  
 $I_s$  の精度も高いものは期待できない。

電力図形により放電電力を求めるには、面積を求めること  
が必要であり、實際上測定はやつかいである。これには図  
1.3.6. の  $C_3, C_4$  を可変として図形の両端の A, B 点(図1.3.7)  
が定点となるようにすれば測定はかなり容易となる。

放電電力図形法の欠点はオーに測定精度が低いことである。  
特に前述の取扱いはセルの絶縁隔壁に誘電損失はないものと

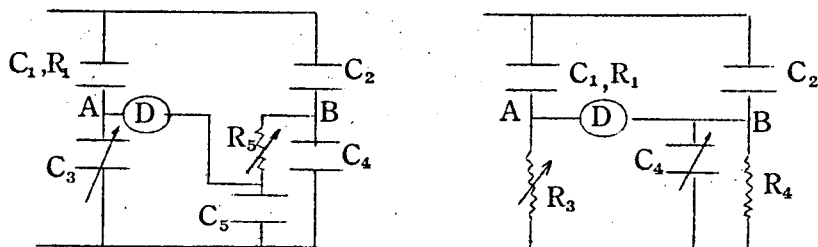
しているが、損失があれば平行四辺形の辺が直線から曲線となつてふくらみを生じ、面積の測定精度は低下する。この場合、放電エネルギー以外のエネルギー損失が、誘電損失のみであれば、回路的に補正することもできるが、後述するように放電に伴つて表面で導電損失が生ずる場合には補正は困難であり、結局測定精度が低下することとなる。次にこの面積は必ずしも正確に電力を表わさない場合があり、たとえば電源変圧器を種々変えて実験した場合、コロナ放電による材料の消耗速度（放電エネルギーに対する）がそれぞれ異なるような結果も得られ、後述のブリッジ法に比して確度が劣るようである。このことの主原因としては、電源よりの誘導電圧があり、これを補償することが容易にできないために起こつた誤差と考えられる。

一方利点としては、放電の状態を外部から容易に知ることができることである。すなわち、たとえば試料上で局部的に放電しやすい点が生じたり、また試料が変形した場合などは図形の歪が生じ、また実験容器等に漏洩電流が生じ、電力測定の誤差の原因となる場合なども、図形の変歪により容易に検出される。これらの特性より、この放電電力図形法は、後述するブリッジ法と併用する補助的測定法として非常にすぐれたものであることがわかる。

### 3.3.3 ブリッジ法

放電の平均電力の測定には電源の基本波のみの測定を行なえばよいことが判明したのであるから、電力の精密な測定にはブリッジ法が適當であることは当然考えられる。誘電正

接の測定法にはまず最初にシェーリングブリッジ (Shöring Bridge, 以下Sブリッジと略称する) が考えられるが, 今回行なつたコロナ劣化の実験のように, 電源の周波数が 1.5 kc, 誘電正接が 0.3~0.5でしかも電流波形に大きな高調波を含む場合にはSブリッジは適当なものでなくなり, 新しいブリッジとしてアンダーソンブリッジ<sup>(2)</sup> (Anderson Bridge) を変形したものを考案した (以下このブリッジをAブリッジと名付ける)。



(a) Aブリッジ

(b) Sブリッジ

$C_1, R_1$  : コロナ劣化実験用セル

$C_2$  : 標準コンデンサ

$C_3, C_4, C_5$  : マイカコンデンサ

$R_3, R_4, R_5$  : 抵抗器

D : 平衡検出器

図 1.3.8 放電電力測定用ブリッジ回路

Aブリッジの回路構成を図 1.3.8 に示した。同時に比較のためにSブリッジの回路をも示した。Aブリッジの各辺のインピーダンスは(1.3.9)式で表わされる。

$$Z_1 = \frac{R_1}{1+j\omega C_1 R_1}, Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}, Z_3 = \frac{1}{j\omega C_3}, Z_4 = \frac{1}{j\omega C_4}, Z_5 = \frac{1}{j\omega C_5} + R_5 \cdots (1.3.9)$$

ここで、 $C_3 \gg C_1$ ,  $C_4 \gg C_2$  とし、各辺の電流は  $Z_1$  ならびに  $Z_2$  によつてきめられるものとする。

平衡条件として(1.3.10)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= C_2 \frac{C_3}{C_4 + C_5} \cdot \frac{1}{1 + \tan^2 \delta_1} \\ \tan \delta_1 &= \omega C_5 R_5 \frac{C_4}{C_4 + C_5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.3.10)$$

(1.3.10)式よりセル全体の等価静電容量  $C_1$  と誘電正接  $\tan \delta_1$  とが求められ、電力は(1.3.11)式で求められる。

$$W = \omega C_1 \tan \delta_1 \cdot V^2 \dots\dots\dots (1.3.11)$$

ここに、 $V$  は印加電圧である。本研究において採用した回路定数としては、

$$C_2 = 100 \mu\text{F} \text{ (標準コンデンサ)}, C_4 = 5 \times 10^{-8} \text{ F}, C_5 = 1 \times 10^{-8} \text{ F} \text{ である。}$$

次にこのAブリッジの測定誤差について検討してみると、(1.3.10)式で求められる誘電正接の値は、ブリッジ各辺が(1.3.9)式に表わされるように純容量ならびに純抵抗の組合せである場合には正しいが、実際問題として  $C_3, C_4$  ならびに  $C_5$  に無損失のコンデンサを得ることは困難である。これらのコンデンサに損失があるとし、その誘電正接が  $10^{-2}$  程度であるとする、試料の誘電正接は(1.3.12)式で表わされる。



$$\tan \delta_1 = \frac{C_4}{C_4 + C_5} \omega C_5 R_5 + \tan \delta_3 - \frac{C_4}{C_4 + C_5} \tan \delta_4 - \frac{C_5}{C_4 + C_5} \tan \delta_5$$

..... (1.3.12)

ここに、 $\tan \delta_3$ 、 $\tan \delta_4$  ならびに  $\tan \delta_5$  は  $C_3$ 、 $C_4$  ならびに  $C_5$  の誘電正接である。式に示すように各素子の損失がそのまゝ  $\tan \delta_1$  の測定値に影響を与える。しかし、 $\tan \delta_3 = \tan \delta_4 = \tan \delta_5$  の場合には、相殺して測定誤差は消失する。次にブリッジの誤差として一般的なのは、図 1.3.8. の A ならびに B 点の大地に対する静電容量と漏洩抵抗とであるが、前者については  $C_3$  ならびに  $C_4$  と並列となるため、容量の値から問題とならず、後者については  $C_3 \sim C_5$  の損失と同様に取り扱うことができ、本実験のように高周波電源を使用すればコンデンサのインピーダンスは減少するため漏洩抵抗による誘電正接の増加はわずかであり、測定に対する影響はほとんどなくなる。

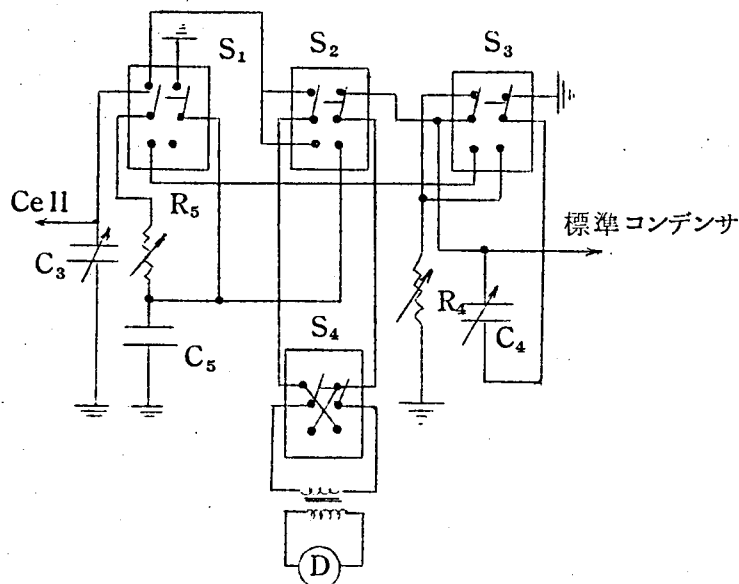
AブリッジがSブリッジに比してすぐれているのは次の諸点である。すなわち、その回路構成から明らかなように、Sブリッジでは、平衡検出端子に放電によつて生ずる大きな高調波電圧が現われ、平衡の判定が困難である。もちろん測定は基本波についての測定であるから濾波器により高調波を除去すればよいが、その場合には感度を上げるために利得の大きい増幅器を必要とし、實際上電磁誘導をうけやすくなり測定がむずかしくなる。これに対しAブリッジでは、ブ

リッジ自体が一種の濾波器の働きをし、平衡検出端子にはほとんど高調波が現われず、また感度を高くとることができるので、簡単な共振回路濾波器とブラウン管オシロスコープのリサージュ図形とによる検出法で容易に平衡検出ができ、測定は簡単であり、かつ精度のよい測定ができることである。

これに対し絶縁材料の材質自体の誘電正接を測定する場合には、その測定せんとする値も小さく、また電流波形の変歪も小さいため、Sブリッジの方が回路素子に基づく誤差が生じない点ですぐれていることは当然である。

Aブリッジを実際に使用する場合には、誘導の影響をさけるために平衡検出端子の正逆両方向の切り替えを行なうが、このとき小さな誘電正接を測定していれば、一方の極性で見かけ上負の値となることもある。したがって、 $C_4$ に直列に可変抵抗を入れてこれを補償する必要がある。また回路素子損失の時間的变化の影響を避けるためには、適当な低損失試料をA、S両ブリッジによつて同時測定を行ない、ときどき性能の確認を行なうことが望ましい。このため実用ブリッジ回路としては図1.3.9.に示す構成とし、両ブリッジの変換を試料に電圧を印加したまゝの状態で行なうようにしている。なお上述の検討は印加電圧の波形が正弦波であるものとして行なっているが、電圧波形に歪があれば当然基本波のみを対象とした測定法では誤差が生ずることになる。本研究において使用した電源は1.5kcの高周波発電機であり、出力電圧には若干の高調波が含まれるが、昇圧変圧器のインダ

クタンスにより高調波が減衰し、試料に印加される電圧はほぼ正弦波となっており、波形歪に基づく誤差は実用上無視できるものと考えられる。



- $C_3, C_4, C_5$  : マイカコンデンサ  
 $R_4, R_5$  : 抵抗器  
 $S_1, S_2, S_3, S_4$  : 切替えスイッチ  
 $D$  : 平衡検出器

図 1.3.9 A, S 両ブリッジ変換回路

- 注) (1)  $S_1, S_2, S_3$  を上側にした場合 S ブリッジ  
           〳                  〳          〳          〳  
           下側                  〳          〳  
 (2)  $R_5$  は S ブリッジとした場合  $R_3$  となる

### 3.3.4 セルの絶縁隔壁の誘電損失

前述のブリッジ法等による放電電力の測定値中には、試料ならびにセルの絶縁隔壁の誘電損失も同時に含まれているため、これを分離することが必要である。 まず簡単な計算法

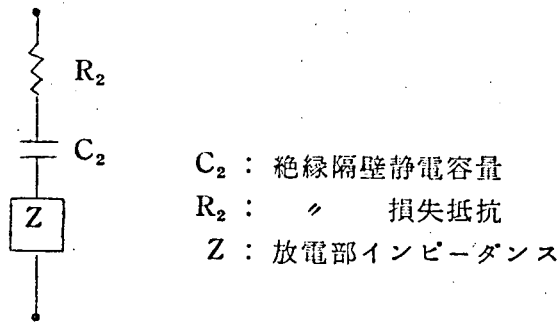


図 1.3.10 コロナ劣化実験用セルの等価回路

としては、等価回路を図1.3.10のように考え電流を正弦波として計算すると、損失  $L_1$  は(1.3.13)式で表わされる。

$$L_1 = I^2 \frac{\tan \delta_2}{\omega C_2} \quad (1.3.13)$$

ここに、 $\tan \delta_2$  はセルの絶縁隔壁と試料とを間隙を介在させずに重ねた場合の誘電正接であり、 $C_2$  はその場合の静電容量である。ブリッジの測定ではセル全体としての放電時の等価静電容量  $C$  ならびに誘電正接  $\tan \delta$  が測定されるため、(1.3.13)式は(1.3.14)式に変換すると便利な形となる。

$$L_1 = (\omega C)^2 (1 + \tan^2 \delta) V^2 \frac{\tan \delta_2}{\omega C_2} \quad (1.3.14)$$

ここに、 $V$  は印加電圧である。

次に放電電流の波形の変歪を考慮に入れて計算すると、誘電損失  $L$  は(1.3.15)式で表わされる。

$$L = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta_1} R_0 I_0^2 d\theta + \int_{\theta_1}^{\pi/2} R_2 I_1^2 d\theta \right]$$

$$= \frac{1}{2} \left[ R_0 I_{0e}^2 (1+a) + R_2 I_{1e}^2 (1-a) \right] \dots (1.3.15)$$

ここに、 $I_0$  ならびに  $I_1$  は (1.3.2), (1.3.3) 式に示される電流値であり、 $I_{0e}$  ならびに  $I_{1e}$  はそれらの実効値である。また  $a = \frac{2\theta_1}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin 2\theta_1$  であり、 $R_1$  ならびに  $R_2$  はボイドが放電しないときならびに放電したときの直列の等価損失抵抗である。(1.3.15)式はまた(1.3.16)式に変換される。

$$L = \frac{1}{2} \omega V^2 \left[ C_0 \tan \delta_0 (1+a) + C_2 \tan \delta_2 (1-a) \right] \dots (1.3.16)$$

ここに、 $\tan \delta_0$  はボイドが放電しない場合の誘電正接であり、 $\tan \delta_2$  は放電した場合、すなわち放電間隙が導体で置き替えられた場合の誘電正接である。本実験の場合には  $\tan \delta_0 \cong \tan \delta_2$  となる場合が多く、この条件が成立すれば (1.3.16)式はさらに簡単になつて(1.3.17)式のようになる。

$$L = \frac{1}{2} \omega V^2 \tan \delta' \{ C_0 (1+a) + C_2 (1-a) \}$$

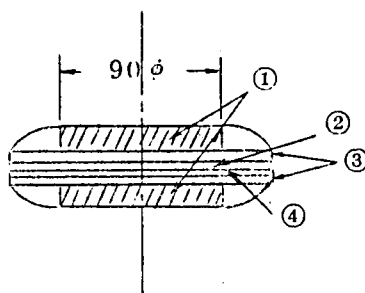
$$= \omega C V^2 \tan \delta' \dots (1.3.17)$$

ここに、 $\tan \delta'$  は  $\tan \delta' = \tan \delta_0 = \tan \delta_2$  として表示したものである。

(1.3.14)式ならびに(1.3.17)式で得られた誘電損失の比をとると(1.3.18)式のようになる。

$$\frac{L_1}{L} = \frac{C}{C_2} (1 + \tan^2 \delta) \quad \text{..... (1.3.18)}$$

一般に上式の値は1より小さくなり、1 mm厚のバイレックスガラスをセルとして使用した実験では0.7~0.9程度となる場合が多かった。しかし、前節で述べたように、セルにガラスを使用しない場合には、損失自体の値も小さくなり、損失はいずれの式によつて計算しても大差はなくなる。したがつて、その場合には計算が簡単でかつ合理的な(1.3.17)式を使用するのが適當である。ここに一例として図1.3.11に示すようなセルの構成の場合の放電電力、等価静電容量ならびに誘電損失等の計算結果を図1.3.12に示した。この値はまた実測結果とも非常によく一致することを確認している。



- ① 電 極
- ② 放電間隙 (1 mm)
- ③ ガラス板 (バイレックス, 1 mm厚)
- ④ 試 料 (ポリエチレン, 0.3 mm厚)

図 1.3.11 電圧特性計算時のセル構成

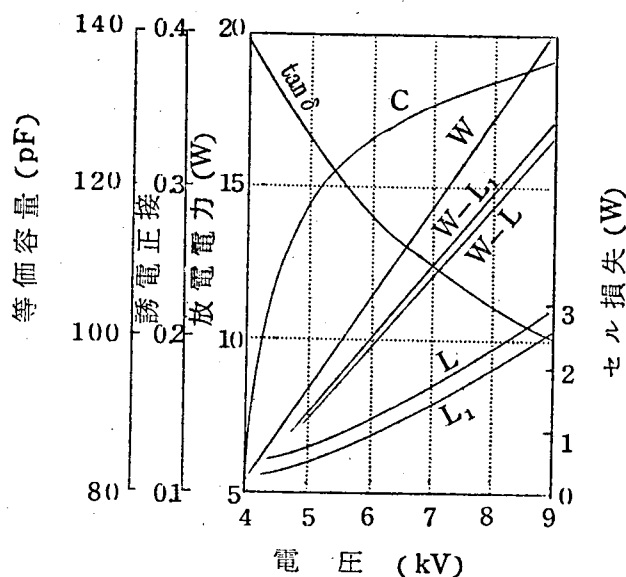


図 1.3.12 コロナ劣化実験用セルの電氣的特性

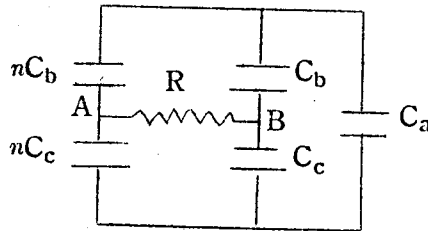
### 3.4 絶縁材料の表面抵抗とコロナ放電エネルギーとの関係

前節にはコロナ放電を均一なものとして取扱い、その電力測定法を述べたが、コロナ放電は本来場所的にも時間的にも不均一なものであり、絶縁材料のコロナ劣化を検討するためには、たとえそれが初期の均一消耗過程を対象とする場合であつても放電の不均一性を考慮することが必要である。しかし、放電は不安定であり、特に湿気により表面抵抗の変動が起こる場合には定量的な解析ならびに測定は非常に困難である。ここには定性的な解析として、ごく簡単な等価回路を使用し、表面抵抗が変動した場合のコロナパルスエネルギーの変動する状態を計算によつて解析した結果を述べる。

### 3.4.1 ボイド放電の等価回路

前章に述べたようにボイド放電の等価回路は図 1.2.8. のように表わすことができ、その場合 1 回のコロナ放電のエネルギーは (1.2.2) 式のように表わされる。ボイド内面の抵抗が低下した場合の等価回路としては図 1.3.13 のものが考えられる。<sup>(2)</sup> すなわち、ボイド  $C_c$  で放電が起こると A, B 間に電位差が生じ、表面漏洩抵抗  $R$  を通して電荷の再配分が起こり、 $R$  中にエネルギー損失が生ずる。 $R$  が比較的大きく、しかも 1 回の放電の継続時間が非常に短く近似的に零とみなしうる場合には、放電停止後の電荷の再配分は図 1.3.14 のように起こり、その場合のエネルギー損失  $W_4$  は (1.3.19) 式で表わされる。

$$W_4 = \frac{1}{2} \frac{n}{n+1} (C_b + C_c) u^2 \quad (1.3.19)$$



$C_a, C_b, C_c$  : 図 1.2.8 と同じ

$R$  : 表面漏洩抵抗

図 1.3.13 ボイド内面の漏洩を考慮した等価回路

ここに、 $u$  は前章の場合と同じく  $C_c$  の放電電圧である。  
(1.3.19) 式は  $R$  の値に関係がなく、エネルギーは電荷の移動の最初と最後との状態の充電エネルギーの差として求められ



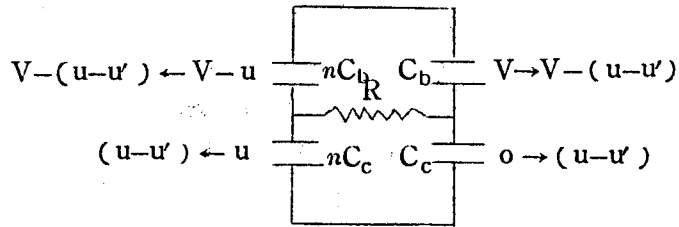


図 1.3.14 1回の放電後の電荷の再配分状況

るが、実際の場合にはくり返し放電であり、 $C_c$  ならびに  $nC_c$  で放電がくり返される間に必ずしも放電後の電荷の再配分によつて両者の同圧化が達成されるとは限らず、 $R$  中で消費されるエネルギーは  $R$  の値によつて変動するはずである。また 1 回のコロナ放電の継続する時間は非常に短いが有限の時間であり、回路の時定数が放電時間と同程度となれば、 $C_c$  に放電が起こつた場合、 $nC_c$  ならびに  $nC_b$  等の電荷の移動によつて  $R$  中にエネルギー損失が生ずるのみならず、同時に  $C_c$  の放電を通じてそれらの電荷が失われ、 $C_c$  部の放電エネルギーの増大が起こる。極端な場合として  $R=0$  となれば  $nC_c$  ならびに  $nC_b$  等の電荷は全部  $C_c$  部の放電に寄与することとなる。すなわち、コロナ劣化の実験においては、印加電圧の上昇速度に関連し、ボイド  $C_c$  ならびに  $nC_c$  が放電電圧に達するに要する時間と、1 回の放電が継続する時間との二つの時定数があり、 $R$  の値に比例する回路の時定数がそれらに対してどこに位置するかによりエネルギー消費の形態が変化するものである。

数値計算を行なうために等価回路の変換について考える。

まず図1.3.14においてR中の電流を求めるため、演算子法に

より p 関数回路を求めると図 1.3.15 のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに } Z_1 &= \frac{1}{nC_b p}, Z_2 = \frac{1}{nC_c p}, Z_3 = \frac{1}{C_b p}, Z_4 = \frac{1}{C_c p}, \\ Z_5 &= R \\ I_1 &= nC_b p (V-u), I_2 = nC_c p u, I_3 = C_b p V \end{aligned} \right\} (1.3.20)$$

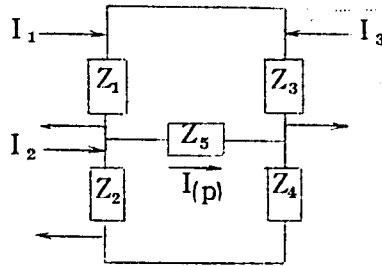


図 1.3.15 電荷の再配分を計算するための等価 p 関数回路

$Z_5$  中の電流  $I(p)$  は (1.3.21) 式で表わされ、さらに t 関数形に変形すると (1.3.22) 式のようにになる。

$$I(p) = \frac{u (C_b + C_c) p}{R (C_b + C_c) p + \frac{1+n}{n}} \quad (1.3.21)$$

$$I(t) = \frac{u}{R} e^{-\frac{n}{n+1} \frac{t}{(C_b + C_c) R}} \quad (1.3.22)$$

同様に  $Z_3$  ならびに  $Z_4$  中の電流は (1.3.23 式) のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_3(t) &= \frac{u}{R} \frac{C_b}{C_b + C_c} e^{-\frac{t}{\frac{n}{n+1}(C_b + C_c)R}} \\ I_4(t) &= \frac{u}{R} \frac{C_c}{C_b + C_c} e^{-\frac{t}{\frac{n}{n+1}(C_b + C_c)R}} \end{aligned} \right\} \dots (1.3.23)$$

(1.3.22) 式ならびに (1.3.23) 式をみれば明らかなように、これらの結果は図 1.3.16 より簡単に求めることができる。すなわち、 $nC_b$  ならびに  $C_b$  の電圧は図 1.3.14 より求められる値と異なるが、変化分を考える場合には同一結果となる。

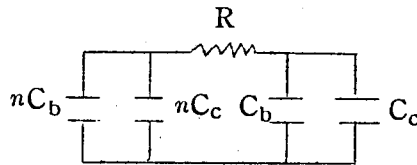
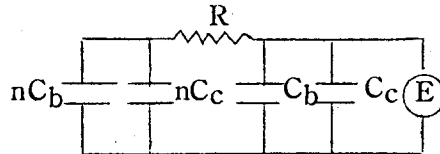


図 1.3.16 電荷の再配分を計算するための等価回路



$$E = ue^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (0 \leq t \leq t_1)$$

図 1.3.17 ボイド放電のエネルギーを計算するための等価回路

同様に  $C_a \gg C_b, C_c$  の条件のもとでは、放電のエネルギーを含めて全エネルギーを求めるための等価回路は図 1.3.17 のよ

うに表わすことができる。この場合放電は回路定数に関係なく短時間に終るとし、 $C_c$  の端子電圧は (1.3.24) 式のように変動するものとする。

$$E = ue^{-\frac{t}{\tau_0}} = ue^{-\alpha t} \quad (0 \leq t \leq t_1) \quad \dots (1.3.24)$$

ただし、放電は  $t_1$  のうちに停止し、等価回路図 1.3.17 においては  $t_1$  以後  $E$  を切りはなすものとする。図 1.3.17 において  $C_b$  ならびに  $C_c$  では  $E$  の時定数に関係なく全電荷が放電によつて失われ、放電エネルギーは (1.2.2) 式で表わされる。 $nC_b$  ならびに  $nC_c$  中の電荷は  $R$  が小さく回路時定数が  $t_1$  と同程度となれば一部  $C_c$  の放電中に失われ、放電停止後は  $C_b$  ならびに  $C_c$  に流入し、 $C_c$  の電圧を上昇させることになる。

数値計算を簡単とするために  $n = 1$ ，ならびに  $C_b = C_c$  とし、図 1.3.18 のように考える。また放電の時定数は  $\tau_0 = 0.25 \times 10^{-7} \text{sec}$  とし、 $10^{-7} \text{sec}$  で放電は停止するものとする ( $t_1 = 10^{-7} \text{sec}$ )。すなわち、 $E$  は  $10^{-7}$  秒 後には  $0.0183u$  となり近似的には零となるものである。

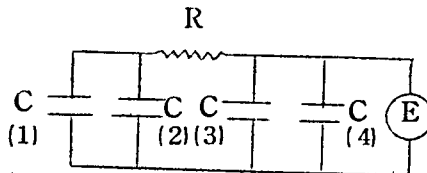


図 1.3.18 数値計算のために簡略化した等価回路

### 3.4.2 数値計算結果

(1)  $C_3$  ならびに  $C_4$  の放電エネルギー

$$[W_0] = \frac{1}{2} (2C) u^2 = Cu^2 \quad \text{となり図1.3.19に示した。}$$

以下本節で〔 〕をつけたものの数値計算の結果は図1.3.19に示してある。

(2)  $C_1$  ならびに  $C_2$  の電荷によるエネルギー

$C_4$  で放電が継続する間に  $R$  を流れる電流  $I(t)$  を求める。

等価  $p$  関数回路は図1.3.20のようになる。 図において

$$I_1 = 2Cpu, \quad E(p) = u \frac{p}{p+\alpha}, \quad Z_1 = \frac{1}{2Cp}, \quad Z_2 = R$$

$$I(p) = \frac{u 2Cp\alpha}{(1+2CRp)(p+\alpha)}$$

$$I(t) = \frac{2C\alpha u}{1-2CR\alpha} \left( e^{-\alpha t} - e^{-\frac{t}{2CR}} \right) \quad (1.3.25)$$

$Z_1$  の端子電圧は同じく図1.3.20より次のようになる。

$$V(p) = \frac{u(2CRp+2CR\alpha+1)p}{(1+2CRp)(p+\alpha)}$$

$$V(t) = \frac{u}{1-2CR\alpha} \left[ e^{-\alpha t} - 2CR\alpha e^{-\frac{t}{2CR}} \right] \quad (1.3.26)$$

〔 $v$ 〕: 放電終了時の  $C_2$  の電圧

(1.3.26)式に  $t_1$  を入れて計算できる。

放電回数 (任意目盛)  
電圧 ( $\times u$ )  
エネルギー ( $\times Cu^2$ )

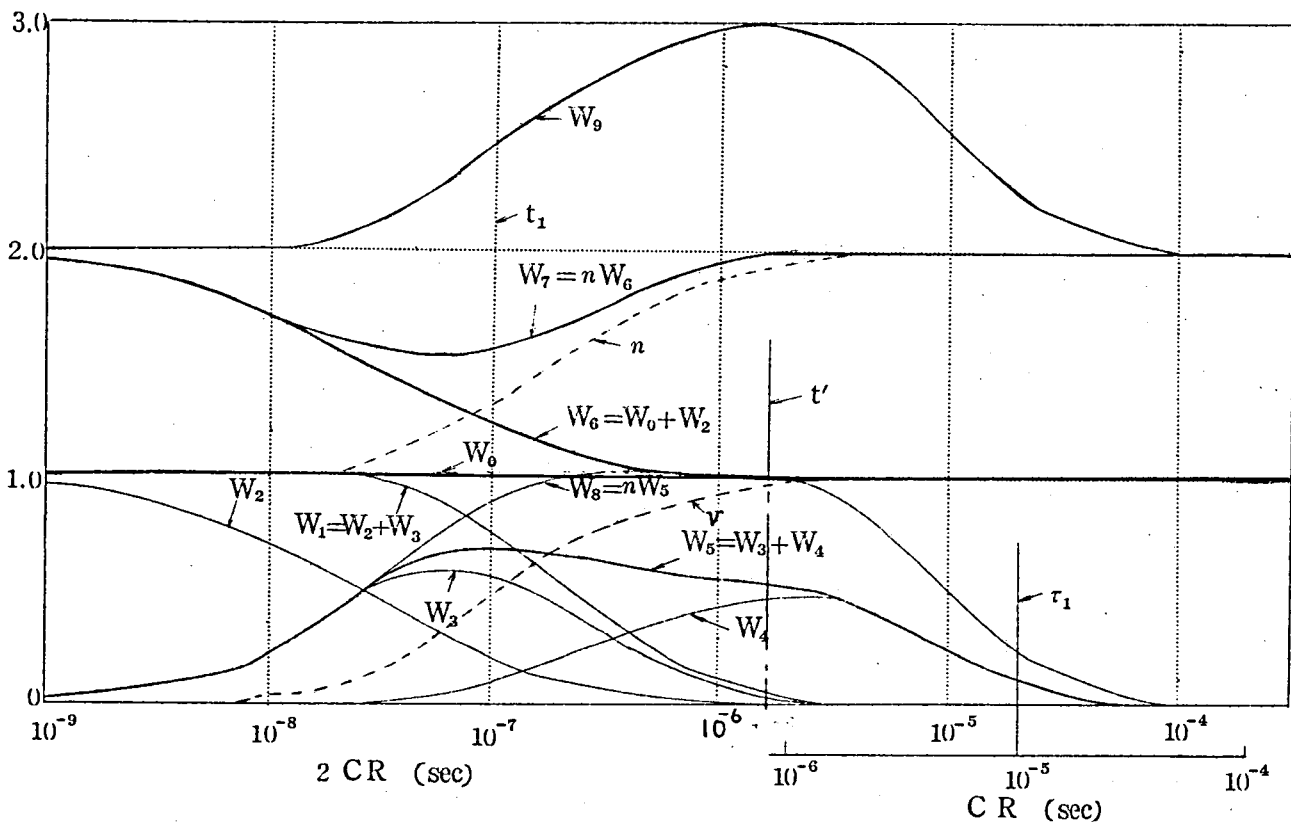


図 1.3.19 回路時定数と放電エネルギーとの関係

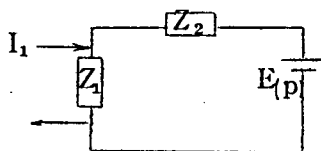


図 1.3.20 放電継続中の電荷の移動を計算  
するための等価 p 関数回路

[ $W_1$ ] : 放電継続中  $C_1$  ならびに  $C_2$  が失う全エネルギー

$$W_1 = \frac{1}{2} (2C) (u^2 - v^2)$$

[ $W_2$ ] :  $C_1$  ならびに  $C_2$  の電荷が  $C_4$  の放電によつて失われる場合の放電エネルギー

$$W_2 = \int_0^{t_1} E I(t) dt = \frac{Cu^2}{1 - 2CR\alpha} \{1 - e^{-2\alpha t_1}\} \\ - \frac{Cu^2 4CR\alpha}{1 - (2CR\alpha)^2} \{1 - e^{-(\alpha + \frac{1}{2CR})t_1}\}$$

[ $W_3$ ] : 放電継続中に R 中で失われるエネルギー

$$W_3 = W_1 - W_2$$

[ $W_4$ ] : 放電停止後電荷の再配分によつて R 中で失われるエネルギー

$$W_4 = \frac{1}{2} C v^2$$

ただし、図 1.3.19 において  $t'$  より右側では減少の傾向をたどるが、これについては後述する。

[ $W_5$ ] : 1 回の放電に伴ない R 中で失われるエネルギー

$$W_5 = W_3 + W_4$$

〔 $W_6$ 〕：1回の放電の放電エネルギー

$$W_6 = W_0 + W_2$$

- (3) 回路の時定数が印加電圧による電圧上昇の時定数に近い場合のR中のエネルギー損失

Rが大きくなり回路の時定数が大きくなると電荷の再配分が完了しないうちに次の放電が起こることになり、1回の放電に伴なりR中のエネルギー損失は減少するに至る。この点を検討するために、まず最初に放電回数の検討を行なう。図1.3.18において $C_2$ と $C_4$ とが交互に放電するものとし、印加電圧は時間に対して直線的に上昇するものとする。ここで図1.3.13にもどつて考えてみると、 $nC_c$ と $C_c$ とは同時に放電し、Rの大小には関係なくR中でのエネルギー損失は起こらないはずである。しかし、実際にはわずかの条件の差異によつて放電の時期がずれることが起こるものである。ここでは簡単のために $C_2$ と $C_4$ との両者の電圧上昇に一定の時間遅れがあるものと考え、またそれらの電圧が0から $u$ まで上昇するに要する時間を $\tau_1$ とする。ここで回路の時定数は放電の時定数 $\tau_0$ よりはるかに大きいため、 $C_4$ の放電中 $C_2$ の電圧降下は起こらず、R中のエネルギー損失は電荷の再配分によるもののみである。

図1.3.21に回路時定数CRが、 $0.1\tau_1$ 、 $0.25\tau_1$ ならびに $\tau_1$ の場合の放電の起こる状況を示した。ここに太線は $C_4$ の電圧を表わし、細線は $C_2$ の電圧を表わすものである。



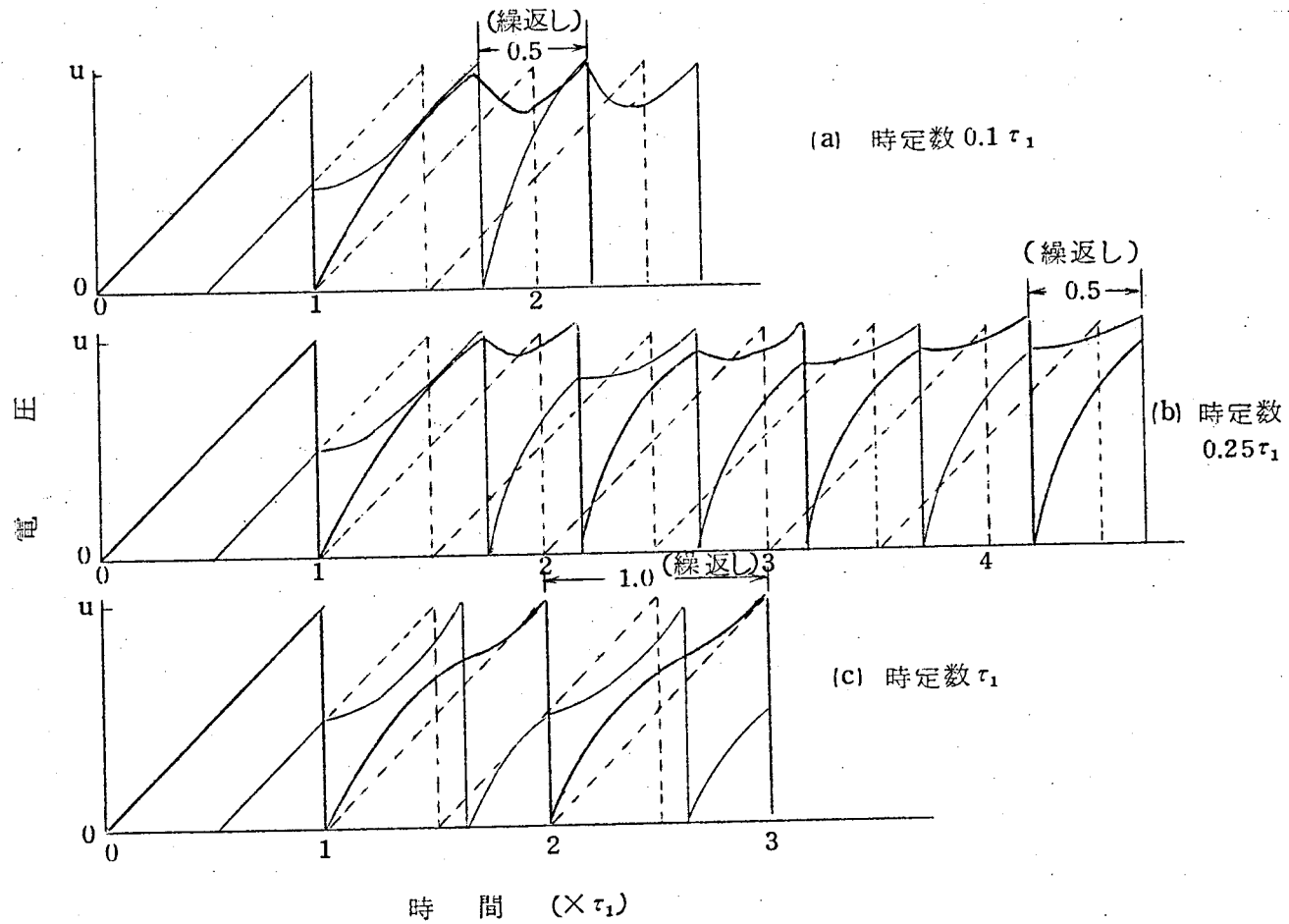


図 1.3.21 ボイド内面の抵抗と放電のくり返し状態との関係

$C_4$  で放電が起こると  $C_4$  は瞬時に 0 まで電圧が低下し、そのときの  $C_2$  の電圧を  $v_{20}$  とすると、その後の  $C_4$  ならびに  $C_2$  の電圧は (1.3.27) 式のように変動する。

$$\left. \begin{aligned} v_4 &= a t + \frac{v_{20}}{2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right) \\ v_2 &= v_{20} + a t - \frac{v_{20}}{2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right) \end{aligned} \right\} \text{..... (1.3.27)}$$

ここに、 $a$  は  $U/\tau_1$  である。

図 1.3.21 において、電荷の再配分により、放電の起こる位相にずれは生ずるが、定常状態では放電の回数は  $R$  の大小に関係のないことが示されている。なお図中点線は  $R = \infty$  の場合の放電状態を示している。結局放電回数の変動は  $R$  が小さく回路時定数が放電の時定数に近いときに起こり、その場合の放電回数は図 1.3.21 と同様にして求められ、しかもそのときには電荷の再配分も電圧上昇の時定数  $\tau_1$  に比すれば瞬時に完了しているため、放電回数を求めることは至極簡単である。図 1.3.19 の  $n$  は放電回数の相対値を示している。

$C_4$  が放電したときの  $C_2$  の電圧を  $v_2$  とし、次に  $C_2$  が放電するまでの間に電荷の再配分により起こる電圧の変動を  $\Delta v$  とすると、 $R$  中のエネルギー損失  $W_4$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} W_4 &= \frac{1}{2} (2C) v_2^2 - \frac{1}{2} (2C) (v_2 - \Delta v)^2 - \frac{1}{2} (2C) \Delta v^2 \\ &= 2C (v_2 - \Delta v) \Delta v \end{aligned}$$

(図 1.3.19 における  $t'$  より右側の  $W_4$ )

図1.3.19では $\tau_1=10^{-5}$ secとして示してあり、これは後章に示すような1.5kcの電圧によりコロナ劣化の実験を行なった場合に実現される値に近いものである。ただし、(1.3.27)式においては電圧が直線的に上昇するとしているが、実際には正弦波電圧により正負の放電がくり返されるものであり、放電回数ならびに $t'$ より右側の $W_4$ は厳密には正しくないが、元来等価回路自体が定性的なものであり、定性的な傾向を示す上では十分なものと考えられる。

[ $W_7$ ] : 放電回数を考慮した単位時間当りの放電エネルギー

$$W_7 = nW_6$$

[ $W_8$ ] : 単位時間当りのR中のエネルギー損失

$$W_8 = nW_5$$

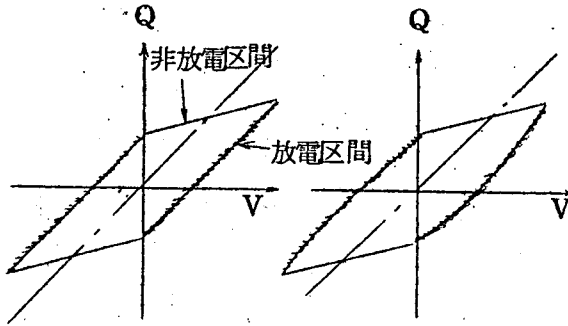
[ $W_9$ ] : 単位時間当りの全放電エネルギー

$$W_9 = W_7 + W_8$$

以上によりボイド内面の抵抗が変動した場合の放電のエネルギー形態の変化が一通り計算により示されたことになる。ここで放電の時定数は外部回路条件に無関係に決まるが、 $\tau_1$ は印加電圧の周波数によつて変動し、たとえば図1.3.19においても $\tau_1$ が大きくなれば $W_4$ は最大値 $\frac{1}{2}Cu^2$ を示す区間が大きくなり、同時に $W_9$ も最大値を示す区間が大きくなることを考慮することが必要である。

なお、ここに考察したような表面の導電損失が存在することは次のことから推定することができる。すなわち高湿時の放電電力はブリッジ法で測定した場合には若干増加する傾向が

あるが、ブラウン管オシロスコープにより電力図形を求めると、図1.3.22のように放電部にふくらみを生じ、これは放電によるエネルギー損失でなく、導電によるエネルギー損失が存在することを意味している。



(a) 乾燥時

(b) 高湿時

図 1.3.22 放電部の湿度と電力図形との関係

なお、図1.3.19には時定数を横軸にとつて示したが、 $R$ の値についておよそその範囲を求めてみる。放電点の固有静電容量を $\kappa$ とし、放電点の隣の放電部としては周りの半径 $r_1$ と $r_2$ との間を考える。表面固有抵抗を $\rho$ とすると次の関係が得られる。

$$C = \kappa \pi (r_2^2 - r_1^2)$$

$$R = \rho \frac{r_2 - r_1}{\pi(r_1 + r_2)}$$

$$CR = \rho \kappa (r_2 - r_1)^2 \quad \dots\dots\dots (1.3.28)$$

ここで、 $r_2 = 0.5 \text{ mm}$ ,  $r_1 = 0.1 \text{ mm}$ , ならびに  $\kappa = 5 \times 10^{-12} \text{ F/cm}^2$  とすると、 $CR = 0.8 \times 10^{-14} \rho \text{ sec}$  となり、図1.3.19に示す時定数  $10^{-9} \sim 10^{-4}$  秒の範囲は  $\rho$  が  $10^5 \sim 10^{10} \Omega$  の範囲となり、後章

に示す実験結果と比較し、コロナ放電をうけた場合には図1.3.19に示すような放電特性が成立するものと考えられる。

### 3.5 コロナ劣化の機構

ここで取り上げた劣化機構は均一消耗過程の機構である。まず乾燥空气中（容器に乾燥剤を封入した状態）で十分な酸素の供給がある場合、すなわちしばしば空気の入れ替えを行なつた実験では図1.3.23に一例を示すように、放電のエネルギーと試料の消耗量とは比例したものとなる。試料の厚さが変われば放電電力が変わるために、単位時間当りの消耗量の増減が生ずるが、単位放電エネルギー当りの消耗量は不変であることを確かめている。ただし、試料厚さがある程度以上大きくなると放電の発熱による試料中の温度勾配により表面温度が変動し、消耗速度の変動も起こるが、実際には定電圧で実験する場合が多く、放電電力が小さくなる傾向と相殺し、試料厚さに関係なく単位放電エネルギー当りの消耗量は等しくなる結果が得られている。これと同様な結果は商用周波数の電源を使用した実験でも成立することが報告されている。<sup>(30)</sup> 次にこのようにコロナ放電により試料厚さが著しく減少したマイラについて絶縁耐力を求めると、表1.3.1. に示すように最初の値からの低下は全然認

表 1.3.1 空气中においてコロナ放電をうけたマイラの絶縁耐力

試 料	試料厚平均値 (mm)	絶 縁 耐 力 (kV/mm)	
		平 均 値	95%信頼区間
劣化実験前	0.039	608	591~625
〃	0.079	572	553~591
劣化実験後	0.044 *	602	560~644

注 \* 劣化実験前の値は 0.079 mm である。

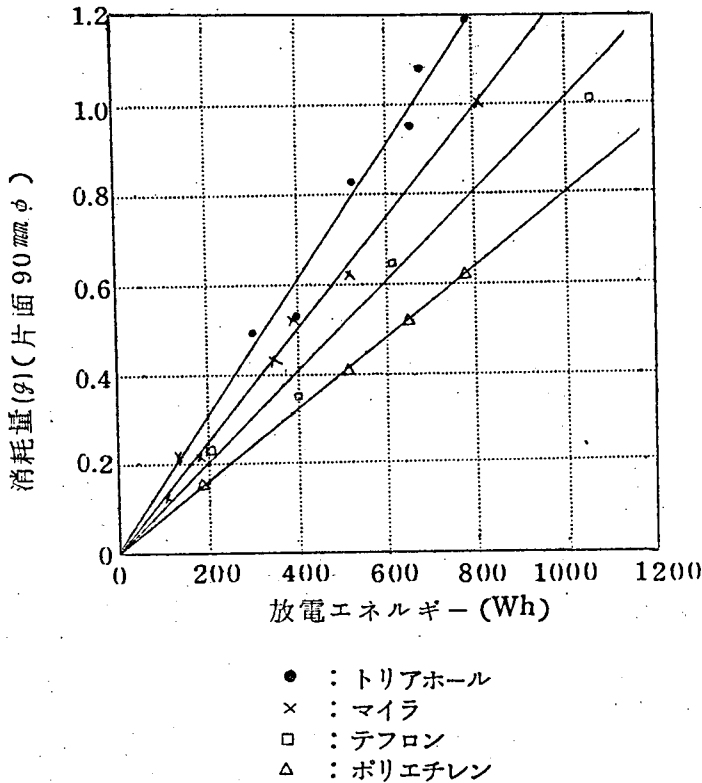


図 1.3.23 放電エネルギーと消費量との関係

注) 実験条件 セル : 図 1.3.2 (絶縁隔壁はガラス)  
 間隙長 : 1 mm  
 雰囲気 : 乾燥空気 (シリカゲル入)  
 温度 : 60 °C

められない。ここで絶縁耐力の測定法は試料を鋼球の間にはさみ全体をエポキシ樹脂により真空注入モールドしたものについて、交流電圧を一定の上昇速度で印加し破壊させたものであり、その測定値は電源電圧の波形が歪んだ場合にも波高値で比較すれば等しい値が得られ、また別に本質的破壊電圧として報告されている値<sup>60)</sup>ともほぼ等しく、このようにして求めた絶縁耐力が全然低下していないことは材質の変化が起こらなかったことを意味するものと考えられ

る。同様な試料につき誘電正接の周波数特性を求めると図1.3.24のようになる。図において低周波の損失が若干増大しているのは窒素の酸化物によつて生じた酸の付着あるいは表面のごく薄い酸化された層の存在によるものと考えられ、試料内部は全然変化していないものと結論される。

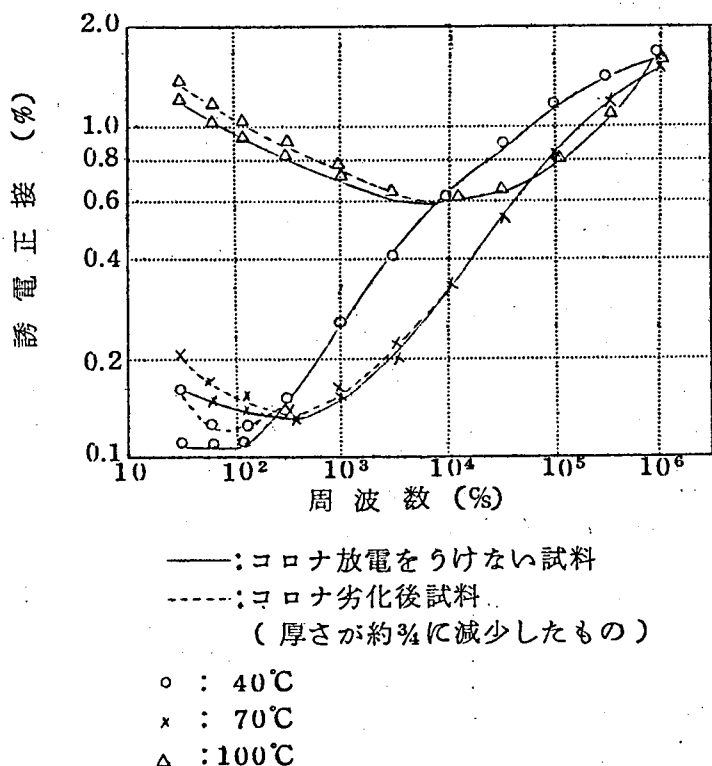


図 1.3.24 コロナ放電を受けたマイラの誘電正接特性

また、本文の方法によりクラフト紙についてコロナ放電を受けたものと、放射線照射を受けたものについて平均重合度の変動を比較すると、前者では初期に低下があるが、その後放電エネルギー量が増し試料は著しく消耗する状態となつても重合度の低下率はわず

かであるのに対し、後者では外見的变化は起こらない範囲でも照射量とともに急速に重合度が低下していることが報告されている。<sup>(92)</sup>

これらの実験より、コロナ放電によつて試料面に衝突する電子ならびにイオンのエネルギーは非常に小さく、内部までは影響しないことがわかる。なお、放射線照射の場合にも酸素が存在すれば酸化が起こることは知られているが、<sup>(93)</sup>その作用は電子衝撃等の直接的作用に比して小さく、この点コロナ放電の場合にはその大小関係が逆となつてゐるものである。

このほか表 1.3.2 にも示すように、アルゴンならびに窒素等の不活性ガス中ではコロナ放電によつて起こる試料の消耗は空気中に比して約 1 桁小さくなつてゐる。アルゴン中ならびに窒素中の両者の実験結果についてみると、放電エネルギー当りの消耗量はアルゴン中の方が多いが、放電電荷量当りの消耗量は両者等しくなつてゐる。すなわち、不活性ガス中では、コロナ放電によつて起こる絶縁材料の消耗は、電子ならびにイオン等の衝突によるものが主体であつて、<sup>(10)</sup>放電のエネルギーは試料の消耗のみに費されるものでないことが示されている。

表 1.3.2 不活性ガス中のコロナ放電による消耗特性

(乾燥空気中(シカケル入) 間隙長1mm, 両面マイラ, 80°C)

No.	気圧 (atm)	ガス組成	放電エネルギー (Wh)	マイラ消耗量, 消耗速度			劣化実験後の ガス組成(%)		
				g (両面)	mg/Wh (片面)	g/Ah (片面)	CO <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>
1	0.3	純A (O <sub>2</sub> , 0.1%以下)	82.8	0.0720	0.44	0.49	0.44	0.44	0
2	0.3	純N <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> , 0.1%以下)	130.4	0.0396	0.15	0.50	0.58	0.20	0

注 消耗速度は 3 回の平均値でありばらつきは約 5 %である。



同様に水素中においてもコロナ放電による絶縁材料の消耗速度は著しく小さいことを確かめており、実際の機器絶縁の場合、たとえば水素冷却発電機等ではコロナ劣化はほとんど起こらないことが推定される。

以上の実験結果が示すように空気中のコロナ劣化はある形式の酸化反応であり、しかも放電時間に比例して消耗量が大きくなる単純表面侵食反応である。したがって、反応をミクロ的に考える場合は別として、絶縁材料の分子構造中分解しにくい部分が残るということなく、全部が気化消耗あるいは一部機械的に粉末状となつて飛散消耗するものである。ただし、放電によつて生じた酸などにより影響をうける場合には当然変化は表面に止らない場合もあり、<sup>(34)</sup>また高温時ある程度の流動性を示すようなものとの複合絶縁の場合には当然液体絶縁材料の性質をあわせ示すことになる。すなわちオ2部に示すように、液体はコロナ放電によりある程度の流動を伴ない、常に新しい面が放電をうけ、全体として重合ならびに縮合、あるいは分解等の変質を起こすものである。

### 3.6 酸化反応の諸形式

空気中のコロナ劣化は酸化が主体であることは判明したが、酸化の機構は当然熱劣化反応とは異なり、耐熱性のよいものが必ずしも耐コロナ性がすぐれているとは限らない。酸化の個々の機構は複雑であり、反応方程式を詳細に求めることは非常に困難であるが、定性的にはコロナ放電によつて起こる反応として次のものが考えられる。

(1) 電子ならびにイオンの絶縁材料表面に対する衝突、あるいは気

中放電部の温度上昇の影響をうけて、表面の温度が局部的かつ瞬間的に大きく上昇し、<sup>(6)</sup>いわゆる熱劣化反応が起こる。この場合酸素の存在が大きく影響を与えることは当然であるが、一方純熱的な分解ならびに蒸発なども起こることが考えられる。しかし実験結果からは後者の機構は劣化の主要部でないことが推定される。

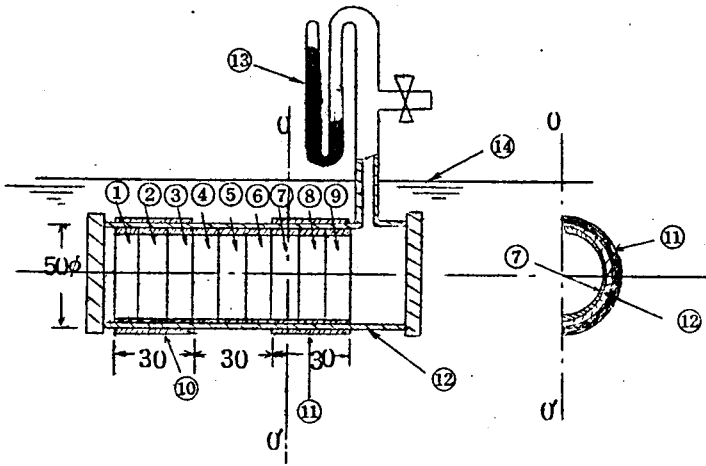
- (2) 電子ならびにイオンの衝突により、絶縁材料の表面分子が化学的に活性化された状態となる。たとえば自由基などが生じ容易に酸素と結合する。
- (3) 放電空間では、酸素自体が電子の衝突によりエネルギーを吸収し活性化した状態となる。<sup>(35)</sup> この活性化された状態は吸収するエネルギーの大小により分子の励起状態、解離した原子状態、あるいはイオンの状態等であり、量的には中性活性化粒子の生成作用はイオン化のそれより相当大きい。<sup>(36)</sup> しかもその活性化された状態が維持される寿命は短いために放電部以外にはほとんど影響を与えないが、放電部においては酸化力が大きく、絶縁材料と容易に結合する。
- (4) 電子ならびにイオンの衝突により化学結合の切断が起こり、<sup>(37)</sup> ガス状低分子量物質となつて消散する。あるいはまた高温状態のみで気体となる程度の分子量のものとなつて消散し、放電圏外でふたたび液体あるいは固体となる。たとえばテフロンについての実験では放電部周辺のガラス面に光沢を有する一種の蒸着膜が生じこの機構の存在することが考えられる。

以上は定性的に反応機構を大別したものであるが、実際にはこ

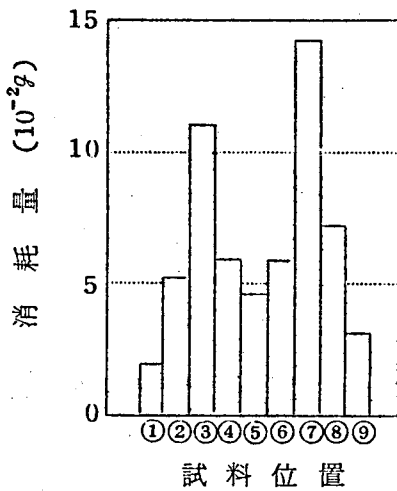
れらが単独で起こることはなく種々の組合せとなり、また材料の性質、放電雰囲気の状態等により反応形式ならびに反応速度が変化するものと考えられる。しかし、いずれの場合にも酸素の影響が大きいことは実験的に明らかな事実である。

コロナ放電による酸化反応機構を解明するための一つの試みとして図 1.3.25 に示す実験を行なった。実験はガラス容器の内側に短冊状に切ったマイラをはり付け、内部を減圧し、外側に電極をはり付け、1.5 kc の電圧を印加して内部で放電させたものである。内圧は 60~80 mm Hg とし、約 30 分毎に乾燥空気を入れ替え、内部で酸素が不足しないようにした。電極下にある試料はイオンならびに電子の衝撃をうけるが、中間部にある試料はほとんど衝撃をうけない。ただし、実験は恒温油槽中で行なわれ、油槽自体は接地されており、放電空間から低圧電極方向以外の方向の電界も存在するため、中間部の試料にも若干の電子ならびにイオンの衝突はあるが、その数は電極下のものに比して桁違いに小さいものと考えられる。これに対し、放電により活性化された酸素は放電空間全体に存在し、中間部にある試料も電極下のものと同様にその影響をうける。図に示すように中間部にある試料の消耗量がかなり多いことは、酸化消耗が酸素のイオンによるもののみでなく、電荷をもたない多くの活性化された酸素によるものが大きいことを意味している。

以上の実験では電界の解析が困難であるために定量的な取扱いができず、また酸素の励起のどの状態がもつとも多く酸化に関与しているかを確かめることはできないが、この場合のコロナ放電による試料の消耗の機構としては、定性的には次のように考えられる。



(a) 実験装置



(b) 試料の消耗量

①～⑨試料(10mm幅の短冊状マイラを容器内部に並べてはり付け)

⑩ 低圧電極(アルミ箔)

⑪ 高圧電極( )

⑫ ガラス容器

⑬ マノメータ

⑭ 油槽油面

図 1.3.25 放電路側面の影響についての検討結果

すなわち、電子ならびにイオンの衝突により放電空間内の酸素ならびに試料表面の分子は活性化され、両者は容易に結合して一部は気化するが、さらに酸化された状態で電子ならびにイオンの衝突をうけることにより気化消耗が促進されるものである。

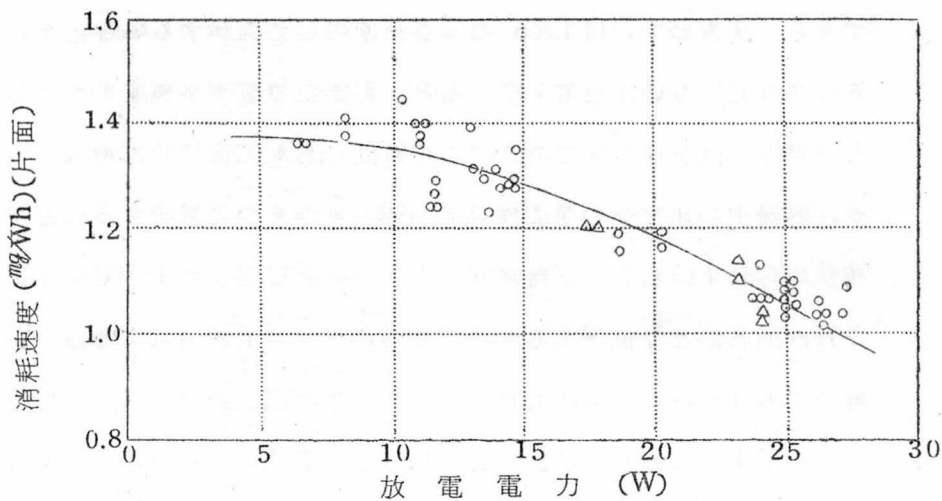
空气中でコロナ放電が起こればオゾンが生ずることは一般によく知られたことであり、オゾンは酸化力の大きいものであるため耐オゾン性の問題と耐コロナ性の問題としばしば混同されることがある。しかしオゾンによる酸化とコロナ放電による酸化消耗とは共通点もあるが、必ずしも同じではない。すなわちC.D.Cooper<sup>(89)</sup>らは、ポリエチレンが酸素中のコロナ放電をうけた場合と、コロナ放電によつて生成されたオゾンの影響をうけた場合とを比較し、カルボニル基の生成状況等より酸化形式としては両者が同一であることを報告している。しかしその場合、カルボニル基の生成量はオゾン酸化によつては、試料の消耗が起こらないため試料内部への酸素の拡散が起こり次第に増加するが、コロナ酸化によつては試料の消耗が起こり、酸化層は試料表面のみに止るため、カルボニル基の量も飽和することを報告している。ここで簡単にオゾンが生ずる機構を考えると、電子の作用により酸素分子から解離した原子状酸素が生じ、これが更に酸素分子と結合してオゾンが生成されるものであり、コロナ放電の場合活性化酸素が絶縁材料あるいは発生ガスを酸化させる反応と、オゾン生成とは一種の競争反応である。<sup>(89)</sup>したがつてコロナ放電による酸化は酸素がオゾンに変換される過程を経て絶縁材料と反応すると考えるよりも、活性化された酸素による直接的作用を考える方が妥当である。このことはまた次の事実からも推定

できる。すなわち、図 1.3.3. の容器を使用して実験する場合、たとえば 80℃において放電を続けると、容器中で酸素が極度に不足しない範囲では絶縁材料の消耗は放電時間とともに直線的に増加するが、容器中のオゾンの量は放電開始時よりかえつて減少することが確かめられている。またオゾンの生成速度は温度が 100℃以上になれば通常かなり低下するものであるが、コロナ放電による酸化消耗の速度は温度とともに大きくなることをも確かめている。

コロナ劣化に対しては、オゾンのほかに窒素の酸化物等、いわゆる気相反応による生成物の影響を強調した報告も多い。<sup>(39)(40)</sup> しかし、それは後節に示すように放電様式を変化させ、むしろ消耗速度を減少させる場合が多く、特に破壊までの寿命を左右する重要な要因とはなるが、コロナ放電による酸化消耗の直接的原因とはならないものである。ただし、材質によつてはこれら硝酸系生成物によつて化学的におかされる場合も当然考えられることである。

### 3.7 放電電力と消耗量との関係

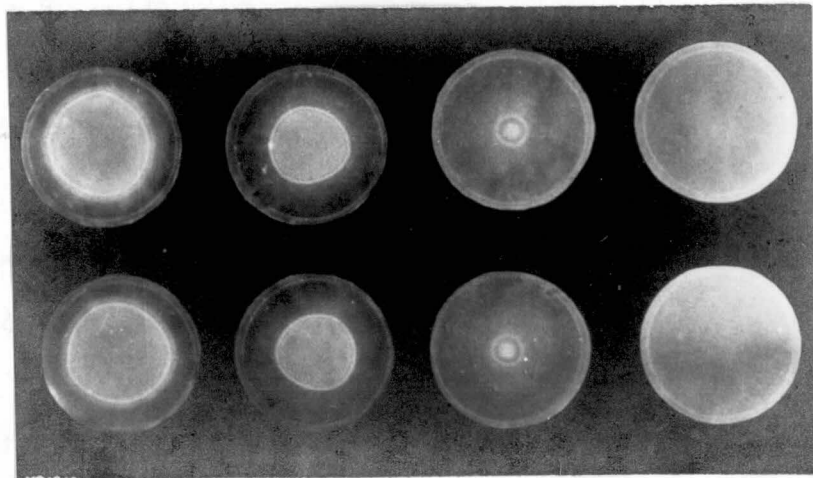
図 1.3.23 に示した特性は試料の消耗が放電エネルギーのみに関係することを示しているが、これは放電電力がある値以下である場合に成立することであり、放電電力が大きくなると図 1.3.26 に示すように単位放電エネルギー当りの消耗量が減少する。これはすでに述べたように、放電電力増大とともに酸化反応速度が大きくなり、セル内部の酸素は急速に消費されるが、外部からの供給は自然対流のみであるため、内部では酸素の不足をきたすことが原因と考えられる。はなはだしい場合にはセルの中央には消耗速度の小さい部分が生じ、外観上表面状態が大きく区分される状態となる。一例



○ : 7kV印加      △ : 6kV印加

図 1.3.26 マイラの放電電力と消耗速度との関係

注) 実験条件    試料: 両面マイラ    間隙長: 1 mm  
 雰囲気: 乾燥空気 (シリカゲル入)    温度: 80℃



放電電力 (W)	1147	5.49	3.30	2.54
放電エネルギー (Wh)	7750	37.00	22.25	17.15
消耗速度 (mg/Wh)	235	2.94	3.41	3.47

図 1.3.27 放電電力と試料表面状態との関係

注) 実験条件    間隙長 : 0.2 mm  
 試料 : 両面マイラ (90 mmφ)  
 雰囲気 : 乾燥空気 (シリカゲル入)  
 温度 : 80℃

を図1.3.27に示した。図に示すように、放電電力が大きいほど中央の消耗の少ない部分が大きく、全体としての放電エネルギー当りの消耗速度が小さくなっており、その程度は図1.3.26に示した場合より著しい。ここで注目すべきことは、中央の消耗の少ない部分の周辺では、消耗速度が最も大きく、かつ表面にざらざらが生じ局部的侵食形式に移行するのもこの部分がもつとも早いことである。実際の絶縁においては、ボイドを完全に外気から遮断することはむずかしく、若干の空気の流通があるのが普通である。一方また放電電力もここで行なつた加速実験に比してかなり小さくなる。したがつて、ある条件のもとでは、加速実験におけるセル中央の消耗の少ない部分の周辺、すなわちもつとも消耗の大きい部分の状態と等価となることは十分考えられ、そのときには寿命が著しく短くなり、このように酸素の消耗と供給との割合は実用上重要な問題と考えられる。

放電間隙の片面をガラスとした場合の試料の厚さの変動の一例を表1.3.3.に示した。この場合にも $90\text{ mm } \phi$ の試料の中央約 $40\text{ mm } \phi$ は消耗が少なくかつ厚さが均一であり、その部分の周辺がもつとも薄くなりかつ凹凸がはげしくなっている。この場合厚さはマイクロメータで測定しているため、凹凸のある部分では平均厚さより大きい値が得られ、実際の厚さの差異は表に示す値より大きくなっている。表に示すように、コロナ放電を間欠的に行なわせたものは、放電停止時にセル内の空気が外気と置換される影響を検討するためのものであり、この場合には連続的に電圧を印加したものに比して中央部の消耗速度は大きくなっている（試料中の他の部分と厚さの



変動を比較すれば明らかである。) したがって、中央の消耗速度の小さい部分については酸素量の影響がそのまま現われたと考えられるが、その周辺の部分においては、どの実験の場合にも、より十分に酸素の供給のあつた試料周辺部に比して消耗速度が大きく、単に酸素量と酸化速度との関係のみでは説明できない現象である。このような現象の起こる原因は放電時の試料の表面抵抗の差異によるものと考えられるが、詳細については第3.9節に述べる。

表 1.3.3 空気の流通不十分な場合の消耗量の位置による変動  
(乾燥空气中(シリカゲル), 間隙長 0.2mm, 対面はガラス,) 70℃

試料	半径方向位置 (mm)	試料残存厚さ ( $\mu$ )	(平均)
マイラ 連続放電 280分	0~20	70~73	71.0
	25~30	60~64	62.5
	35~40	65~72	67.2
	45~50*	77~82	80.0
マイラ 20分放電 10分休止 計160分 放電	0~20	70~72	70.6
	25~30	64~66	65.0
	35~40	65~68	66.4
	45~50*	76~80	77.4

注) \* 放電をうけない部分である。

### 3.8 乾燥剤の影響

以上の実験は乾燥剤としてシリカゲルを容器中に入れた状態で行つたものであるが、乾燥剤を使用しない場合には消耗量はかなり小さくなる。実験結果の一例を表1.3.4.に示した。沿面コロナを対象とした場合には、水分の存在が破壊までの寿命を長くすること

表 1.3.4 コロナ放電による消耗に対する乾燥剤の影響

(乾燥空气中(シカゲ入), 間隙長 1 mm, 両面マイラ, 80℃)

放電電力 (W)	コロナ放電による消耗速度(mg/Wh) (片面)	
	乾燥剤あり	乾燥剤なし
27.7	1.01 , 1.00	0.75 , 0.75
16.1	1.19 , 1.25	0.82 , 0.81
11.0	1.30 , 1.40	0.86 , 0.91

はすでに一般に知られた事実であり、<sup>(19)(20)</sup> その場合には電極周辺の試料の表面抵抗が低下し放電が起こりにくくなることが原因である。しかし、ここで行なつた実験ではボイドの面積は大きく、かつスベーサは少ないのでそのような現象は起こらない。すなわち、放電の細部の様式はともかくとして、全体としての放電電力は湿度の増大によつて減少することなく、むしろ増大する傾向のあることを確かめている。一方また後章に示すように、酸素中の実験において水分は水蒸気として放電空間に存在するのみでは、放電による材料の消耗速度にほとんど影響しないことも確かめられている。空气中では、放電によつて絶縁材料から発生する炭酸ガスと水とのほかに窒素の酸化物も生ずる。<sup>(21)</sup> この窒素の酸化物にはガス状で放電空間に存在しても酸化を妨げる作用があることも一応考えられるが、その影響は大きくないものと推定される。それよりも発生水分と結合して酸が生成され、表面抵抗を低下させる働きが大きいものと考えられる。放電時の試料の表面抵抗は後に述べるように、一般にかなり低下するものである。これらのことより乾燥剤の有無は放

電時の試料の表面抵抗に影響を及ぼし、コロナによる酸化消耗の速度に影響を与えるものと考えられる。すなわち、放電時試料の表面抵抗が低下すると、図1.3.19に示したように表面導電による損失が生ずるが、ブリッジで測定するエネルギーはこれらの導電損を含めたものを放電電力として求めることとなり、見かけ上単位放電エネルギー当りの消耗量が減少する結果となる。しかし、このような機構のみではすべての場合を説明することは困難であり、次に考えられる機構としては、図1.3.19の左側で単位時間当りの放電エネルギーの減少することに対応するものがある。すなわち、この場合にも全体としての電力は表面抵抗の大きい場合に比して少なくなっていないので見かけの放電エネルギー当りの消耗量が減少することが考えられる。次には図1.3.19で放電のエネルギーとしたものでも表面抵抗によつて試料の消耗に関与する割合が異なるものと考えられる。すなわち表面抵抗が低下して1回の放電のエネルギーが増加するような状態となれば、放電点の周りには一種の浴面放電が起こり、そこでは電子ならびにイオンの試料面に対する有効な衝突の割合が減少するため、放電エネルギー当りの消耗量の減少となるものである。後章に示すように、試料の表面抵抗は通常の測定法によつては表面のミクロな部分の値を知ることはできず、また放電による発熱で試料面上では水分の蒸発ならびに吸着をくり返すことが考えられ、定量的な取扱いは困難であるが、上記3種の機構により高湿時の消耗速度が減少するものと考えられる。

### 3.9 酸素量とコロナ放電による酸化速度との関係

後述する酸素中の放電における酸化の速度は一次反応であり、酸

素濃度のみに関係するが、空気中での試料の消耗速度はそのような特性とは若干異なつたものになる。

乾燥剤を入れた空気中において、マイラについて放電エネルギーと酸素濃度の変動、消耗量ならびに炭酸ガス量との関係を求め図1.3.28に示した。この場合ガス分析はオルザット分析器で行なっているため、炭酸ガス量には若干の窒素の酸化物の分も含まれているが、この実験のように比較的多量のガスを取扱う場合には誤差はわずかであると考えられる。また一酸化炭素については測定法上精密な結果は得られないが、存在は認められず、0.5%以下であることは確かめられている。図1.3.28における顕著な特徴は、酸素

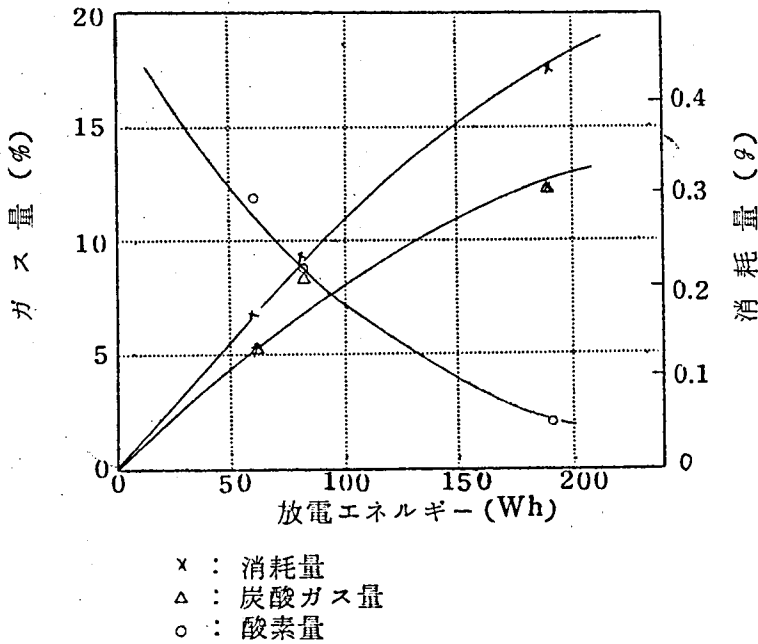


図 1.3.28 コロナ放電によるガス発生経過

注) 実験条件    試料 : 両面マイラ  
                   間隙長 : 1 mm  
                   雰囲気 : 乾燥空気 (シリカゲル入)  
                   温度 : 80 °C  
                   容器容積 : 約 2.6 l

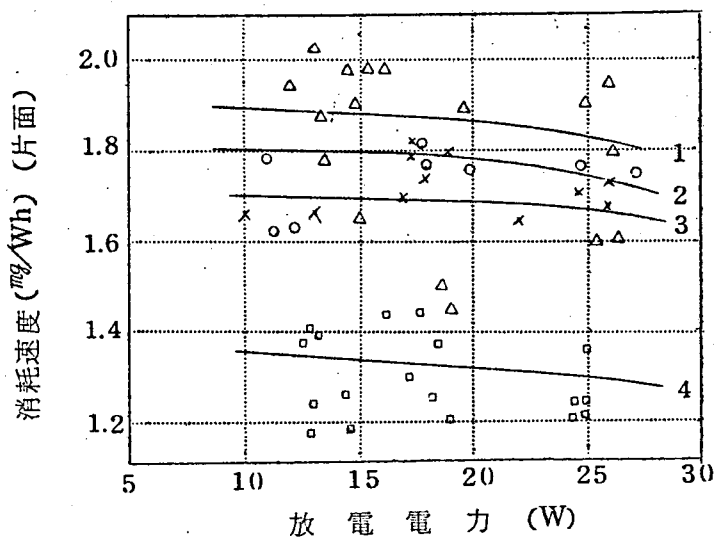
量がかなり減少しても試料の消耗速度の低下はわずかであることである。またこのときの試料の表面状態は内部の方がかなり粗れており、図1.3.27に相当するような状態である。もちろんこの場合には容器内の酸素量が全体として減少したのであるから、図1.3.27のように試料面上に明確な境界線はなく、境界線が同心的に数多く存在する状態であることを確認している。

以上の特性よりオ 3.7 節にて考察した放電電力によつて試料表面状態の変化が起こつた原因を推定することができる。すなわち、図1.3.27に示した試料の中央部、すなわち消耗速度が小さい部分では酸素濃度が不足したために酸化速度が小さくなつたものと考えることが妥当である。しかし、この実験では中央部はまだ完全に酸素がない状態とはならず、この部分の消耗でもなお酸素の影響が大きいものと考えられる。次にその周辺のもつとも消耗速度の大きい部分であるが、ここでは明らかに酸素濃度の点ではセルの周辺すなわち試料の周辺部より小さいはずである。それにもかゝらず消耗速度が大きくなるのは、この部分の試料の表面抵抗が大きくなるためと考えられる。すなわちこの部分では放電空間の酸素濃度が小さいので発生ガスは全部が必ずしも炭酸ガスと水とになるような完全酸化が行なわれず、水分発生が少なく表面抵抗が大きくなつたものと考えられる。あるいはまたこの部分で窒素の酸化物の生成する割合が少なくなることも考えられる。表面抵抗が大きい場合に消耗速度が大きいのは前節に述べた機構によるものであり、結局放電電力が大きく内部で酸素の不足が起これば、酸素減少により酸化速度を小さくする作用と、表面抵抗が大きくなつて放電電力の消

耗に關与する有効分が大きくなり、酸化消耗速度を大きくする作用との相反する二つの作用が生じ、その組合せ条件により消耗速度の大小が決わられるものと考えることができる。なお、図1.3.26に示すように放電間隙長が大きく、図1.3.27のような表面状態の変化が生じない程度でしかも酸素の不足がそれほど著しくない場合に、放電電力が大きくなるにつれて単位放電エネルギー当りの消耗量が減少するのは、酸素濃度の大小による酸化速度の問題よりも、発生水分が多く、外部の乾燥剤に吸収される速度に制限があるため表面抵抗が低下することが主原因と考えられる。すなわち、表面抵抗の変動も放電電力の増加とともに一様に低下するものでなく、ボイド寸法、ガス組成ならびに絶縁材料の材質等に関係して変動し、マイラの場合放電電力が大きくなると最初低下し、その後は再上昇が起こるものと考えられる。

### 3.10 ボイド対向面の材質の影響

コロナ放電による酸化消耗の速度は放電空間の対向面の性質によつて変動する。前節までに考察したものは主としてボイド内面が同一材質のものについてであつたが、対向面としてコロナ放電によつて消耗が全然、あるいはほとんど起こらない材質を使用した場合の実験結果の一例を図1.3.29に示した。図より両面マイラの場合（図1.3.26）に比して放電電力による単位エネルギー当りの消耗量の変動が小さいのは、片面のみが消耗し、全体としての酸素の消費速度ならびに水分の発生速度が小さく、ガス組成の変化も少ないためと考えられる。また、ばらつきが非常に大きく、特に対向面が金属の場合にはその程度が著しいのも大きな特徴である。コロナ



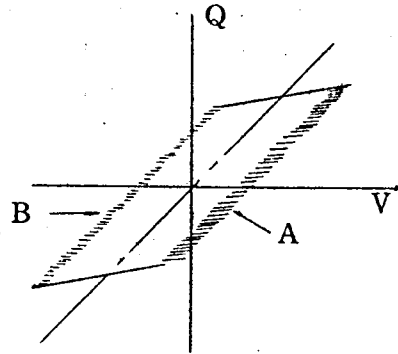
試料状態

1. Δ : 不銹鋼-マイラ
2. ○ : マイラー-マイラ (片面はアルミ箔はり付け)
3. × : 鋼 - マイラ (鋼はシリコーン処理)
4. □ : マイラー-マイラ (片面はシリコーン処理)

図 1.3.29 各種条件下のマイラのコロナ放電による消耗特性

注) 実験条件 雰囲気 : 乾燥空気 (シカゲル入)  
 間隙長 : 1 mm  
 温度 : 80°C

放電の個々のパルスの測定はこの実験の場合には行なっていないし、またこのように広い面積の放電でパルスを測定することも現象を解析するきめてとなるものとも考えられないが、定性的なパルスの平均値はブラウン管の電力図形より簡単に知ることができる。すなわち図1.3.30に示すように、放電区間にコロナパルスが重畳してみられる。このパルスの大きさがボイド対向面によつて変動し、対向面が金属あるいはガラス等の消耗のない材質ではそれらが正極性となつて放電するときにパルスが大きくなる傾向がある。また金



A : ボイド上面正極性放電区間

B :       〃       負       〃       〃

図 1.3.30 コロナパルスと放電電力図形との関係

屑の場合に同一構造ならびに同一材質としても実験のたびごとにパルスの大きさが異なり、必ずしも定量的な関係は得られないが、パルスの大きくなっているときの方が消耗速度が大きくなる傾向があり、この原因としては放電時の試料表面抵抗が関係しているものと考えられる。すなわち、図1.3.19に示した解析結果では、個々のパルスの大きさは表面抵抗がかなり小さくなるまでは変動せず、極度に小さくなるとパルスは逆に大きくなる特性であるが、広い面積内での放電の場合には隣接点が同時に放電していわゆる群放電を起こし、コロナパルスが見かけ上大きくなる現象のあることが知られている。<sup>(41)</sup> この群放電が起こる条件について考えてみると、表面抵抗が大きい場合に起こりやすく、抵抗が低下すれば図1.3.21より推定できるように、隣接点で先に放電が起こるとそのためにただちに電圧が低下し、隣接点と同時に放電が起こる可能性が減少するものと考えられる。結局この実験の場合には表面抵抗が高いと群放電が



起こりやすく、見かけ上コロナパルスが大きくなり、しかも単位エネルギー当りの消費量が大きくなるものと考えられる。なお表面抵抗については後章に測定結果を示すが、初期吸着水分の影響が、放電によつて発生する水分によつて累積的に拡大され、抵抗値のばらつきが生じ、これが消費速度のばらつきの原因になつたものと考えられ、ボイドの両面が消耗の起こる材質の場合にはその累積的影響が比較的小さくなつたものと考えられる。

このほか両面とも消耗が起こるものとしてマイラとポリエチレンとを組合わせた場合と、単独材質を組合わせた場合との消費速度の特性を図1.3.31に示した。この場合両材質を組合わせたものは両

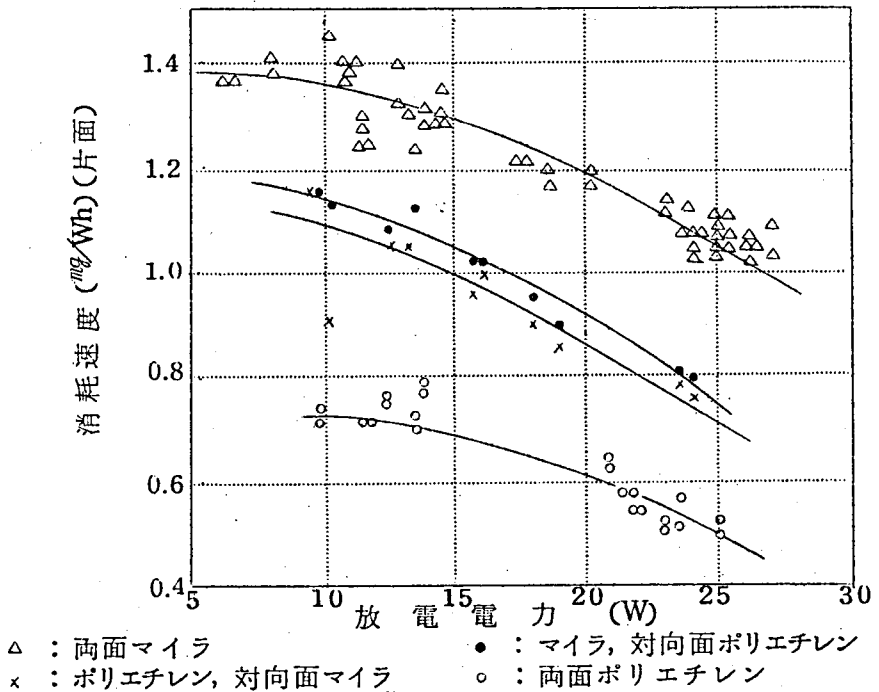


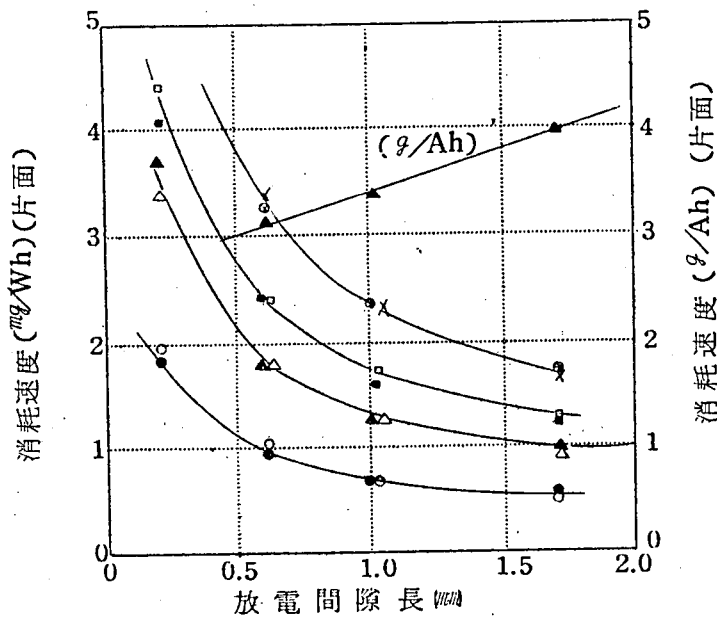
図 1.3.31 マイラとポリエチレンとの組合わせによる消耗特性の変化

注) 実験条件 間隙長: 1 mm  
 雰囲気: 乾燥空気(シリカゲル入)  
 温度: 80 °C

者単独の場合の中間の値に近づいている。このことの原因としては、発生ガスの影響等複雑なものがあることも考えられるが、主原因としては発生水分により表面抵抗の変動が起こり、放電様式が変化したためと考えられる。すなわち、ポリエチレンは消耗の速度はマイラより小さいが、酸化による発生水分は多く表面抵抗の低下は大きいものである。

### 3.11 放電間隙長の影響

間隙長と消耗速度との関係の一例を図1.3.32に示した。ここで各実験値は放電によるガスの組成変化の影響を受けない範囲の放電



試料状態	実測値	計算値
マイカーケルF	x	⊙
不銹鋼-マイラ	■	□
ポリエチレン-ポリエチレン	●	○
マイラ-マイラ	▲	△

図 1.3.32 放電間隙長と消耗速度との関係

注) 実験条件, 雰囲気: 乾燥空気(シリカゲル入)  
温度: 80℃

電力による実験で得た値である。放電電力は放電空間全体についての値であり、一方材料の消耗の起こるのは表面からのみであるから、間隙長を変動させれば当然単位放電エネルギー当りの消耗量は変動するはずである。コロナ放電による酸化反応の速度がオ 3.6 節に述べたどの機構により決められるかということは明確ではないが、もし電子ならびにイオンが衝突して起こる絶縁材料の活性化状態の生成速度によつてのみ反応速度が決まるとすれば、常圧の空間では電子の平均自由行程は小さく、間隙全長にわたつて加速される確率はわずかであるから、放電エネルギー当りの消耗量は間隙長に逆比例したような特性になるはずであり、また放電電荷量当りの消耗量は間隙長に無関係となるはずである。コロナ放電により気相反応として起こる緩酸化反応では、放電容器寸法が一定であれば放電電流によつてのみ反応速度が決まることが知られており、<sup>(35)</sup> 固体絶縁材料においてもほぼこれに近い関係となるが、必ずしも一致しない特性である。すでに述べたように、酸化消耗の機構として電子ならびにイオンの衝突が起こることが必要であることは当然であるが、放電空間で生成される活性化された酸素により酸化が起こるものと考えられる。したがつて、コロナによる酸化速度は電子ならびにイオンの衝突する数と、そのとき試料表面近くで強力な酸化力をもつた活性化状態の酸素分子あるいは原子の数とで決定されるものと考えることができる。この場合に活性化状態の酸素は、試料表面近くで生成したものと、同時に放電空間全体で生成され、そのまゝの状態ですべて試料まで達したものととの和となる。酸素の活性化された状態は寿命が短く、試料と有効に反応を起こしうる確率を、生成された

位置から試料面までの距離の $-n$ 乗に比例するものと仮定すると、  
(1.3.29)式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{単位エネルギー当りの消耗量} &= \frac{k}{\ell} \int_0^{\ell} x^{-n} dx \\ &= k \cdot \frac{\ell^{-n}}{1-n} \dots\dots\dots (1.3.29) \end{aligned}$$

ここに、 $k$ は定数、 $\ell$ は間隙長である。

実験値として $n=0.59$ として各場合について計算すると図に示すように実験結果とよい一致が得られる。 図1.3.31よりわかるように、 $k$ は各材質ならびに対向面の性質により異なつた値をとることは当然であるが、 $n$ は各場合について同一な値をとることは興味あることであり、上記の考察が妥当であることを示すものと考えられる。

以上はコロナ放電が均一なものとして考察したものであるが、前節までに述べたように、空気中の放電では特に試料面の表面抵抗が変動することが起こり、これが放電様式を変化させ、さらに消耗速度にも影響を与えるので、放電間隙長により単位エネルギー当りの消耗量の変動する機構を実験によつて明確に求めることは困難である。 実験条件をさらに単純化した場合の精密な実験結果については次章に述べるが、(1.3.29)式もだいたいの傾向を示すものとして有用なものと考えられる。

同様に温度の影響についても、各種絶縁材料につき見かけの活性化エネルギーが $25 \sim 5 \text{ kcal/mol}$ という通常の酸化反応に比して小さい

値が得られているが、実験精度が必ずしも十分でないので、これについての定量的検討結果は次章に述べる。

### 3.12 酸化防止剤の影響

空気中におけるコロナ劣化において、初期段階での消耗過程は一種の酸化反応であるため、酸化防止剤がコロナ劣化防止剤の役目を果たすや否やということは当然検討すべき問題である。実験はポリエチレン中にN,N' diphenyl-p-phenylene-diamine を添加したもの等について行なつた。これらはポリエチレンの酸化防止剤として一般に使用されているものである。実験結果を表 1.3.5. に示したが、表よりコロナ劣化、すなわちコロナ放電によつて起こる酸

表 1.3.5 ポリエチレンのコロナ放電による消耗に対する酸化防止剤の影響

(乾燥空气中(シリカゲル入), 間隙長 1 mm, 対向面は  
マイラにシリコン塗布またはマイカはり付け, 80°C)

No.	試 料			コロナ劣化による消耗速度 (mg/Wh)(片面)
	名 称	樹 脂	酸化防止剤	
1	DYNJ	DYNJ	な し	1.08
2	DFD-2401	DYNH	NN' diphenyl-p-phenylene diamine (0.2%)	0.95
3	DFD-6015	DYNH	上記防止剤とカーボン(25%)	0.98* 1.2** 1.1***
4	DFD-2005	DYNJ	有機硫黄化合物(0.05%)	0.95

注) (1) 消耗速度は 3 ~ 8 回の平均値であつてばらつきは約 ± 5 % である

(2) 6015 は表面にカーボンが残る。

\* 新試料について約 50Wh の放電による値である。

\*\* 上記実験後表面のカーボンを除去しふたゝび約 50Wh の放電をさせた後の値である。

\*\*\* 約 50Wh の実験後表面にカーボンの残存する状態を初期状態とし、その後 約 50Wh の放電によつて得た値である。

化速度は酸化防止剤の添加によつてほとんど変動せず、コロナ劣化防止剤としての効果はないことが判明した。一般に酸化防止剤ははげしい酸化が起こる場合には効果のないものであり、<sup>(42)</sup>この意味ではコロナ放電によつて起こる酸化もかなりはげしい酸化ということができる。このような結論は他にも浴面コロナによる破壊までの寿命を対象とした研究において報告されている。<sup>(43)</sup>ここでカーボン混入のものはカーボンのみ表面に残り、カーボンの析出状況によつては表面抵抗の低下することとも考えられ、これは放電エネルギー密度の増大をきたすという負の作用と、<sup>(43)</sup>ポイド放電が消滅するという有効な作用とが考えられ、<sup>(44)(45)(46)</sup>今後検討すべき問題である。

### 3.13 各種絶縁材料のコロナ放電による消耗特性

直鎖状分子構造をもつものの一例として、ポリエチレン、ポリプロピレン、P.V.C (Geon 101)、ポリ四弗化エチレンならびにポリ三弗化塩化エチレン(後の二者は大阪金属KKの製品)について乾燥空気中のコロナ放電による消耗速度の比較を行ない、結果を表 1.3.6 に示した。ポリ四弗化エチレンならびにポリ三弗化塩化エチレンでは放電により腐食性のあるガスが生成され、放電間隙対向面がマイラにシリコーンを塗布した程度のものでは短時間に絶縁破壊が起こる場合が多い。また、対向面がマイカの場合と上記シリコーンの場合とでは消耗速度に差が認められる。これに対しポリエチレン等では両条件によりほとんど差がない結果であつた。現段階では反応速度と分子構造との関係を明確にすることはできず、ここには実験結果の一例を示すに止める。

表 1.3.6 直鎖状分子構造をもつ材料のコロナ放電による消耗特性

(乾燥空气中(シカゲル入), 間隙長1mm, 対向面はマイラにシリコン塗布, 80°C)

No.	試料	消耗速度(mg/Wh)(片面)
1	ポリエチレン(DYNJ)	1.08
2	ポリプロピレン	1.36
3	PVC (Geon 101)	2.06
4	ダイフロン(大阪金属)	2.08    2.36 *
5	ポリフロン(    )	1.41    1.86 *

注) (1) 実験結果のばらつきは約±5%

(2) ダイフロン, ポリフロンはそれぞれケルF, (ポリ=酸化塩化エチレン),  
テフロン(ポリ四酸化エチレン)に相当するものがある。

(3) \* 対向面としてはマイラにマイカ片をはり付けて使用。

以上の材質のほか、エポキシ樹脂ならびにポリエステル樹脂等  
実用される数種の絶縁材料について比較を行なつたが、いずれも大  
差がなく、材質の差異により単位放電エネルギー当りの消耗量が2  
倍まで変化するものはほとんど存在しない結果である。したがつ  
て、コロナ劣化に対しては後述するBならびにC過程についても同  
様であるが、分子構造上の差異はほとんど影響なく、変化があると  
すれば、表面抵抗が変動しやすいとか、あるいはまた発生水分の大  
小ならびに水との親和性の大小等の性質の差により放電様式に変化  
が生じ、それが間接的にコロナ放電による消耗速度に影響を与える  
場合が多い。したがつて、分子内の原子間結合力と消耗速度、す  
なわち一般的に分子構造と耐コロナ性との関連を求めることは非常  
にむずかしい問題である。しかし実用的に耐コロナ性のよい絶縁  
構造をうる目的では、後章に示すように材質単独のいわゆる耐コロ

ナ性よりも、耐熱性等の他の性質が重要である場合が多いものである。

なお、ここで例外的なものとしてはシリコーンがある。<sup>(47)(48)</sup> 一般に無機絶縁材料は安定な酸化物であり、耐コロナ性は有機絶縁材料に比して格段にすぐれている。シリコーンは両者の中間に位置し、単独でコロナによる消耗速度を求めれば通常の有機絶縁材料よりも一桁以上小さい値となる。したがって、さきに述べたことと一見矛盾するが、耐コロナ性と分子構造との関係についての検討も今後に残された重要問題であることはもちろんである。なおシリコーンについては後章に示すように、高電界下では必ずしも絶縁破壊までの寿命は長くなく、そのすぐれた耐コロナ性を有効に発揮させるためには使用法についての検討が必要である。

### 3.1.4 総 括

以上により固体絶縁材料の空気中のコロナ放電による消耗の特性がかなり明らかになつたものと考えられる。すなわち、コロナ放電による絶縁材料の消耗は、酸素の存在下では一種の酸化反応によるものであり、この反応は表面からのみ起こり内部では変質は起こらないものである。また消耗の速度を決めるものは、まずオーに単位時間当りの放電の量ではあるが、同一の放電量に対しても、酸素の供給される速度ならびに酸化により消費される速度等の複雑な組み合わせ条件によつて変動することが確かめられた。一般には酸素供給量が不足するとともに酸化速度は小さくなるが、その途中で消耗速度の最大値が生ずるのが特異な現象であり、このような複雑な現象が生ずるのは、放電時表面抵抗の変動が生じ、放電様式が変化



するためと考えられる。 定量的にこれらの諸現象を解明するためには、今後の実験検討をまつべきところが多いが、ここで検討したことのみからもコロナ劣化が熱劣化に比して複雑な現象であることがわかる。

#### 4. 発生ガス量測定によるコロナ酸化消耗特性の検討<sup>(3) (49)</sup>

##### 4.1 目 的

酸素が存在する場合のコロナ放電による絶縁材料の消耗機構は一種の酸化であることは前章に述べた通りである。 この場合絶縁材料から発生するガスは、分子内に特殊な元素、たとえばハロゲン等を含む場合を別として炭酸ガスと水とである。 マススペクトルによるガス分析結果の一例を表 1.4.1. に示したが、同様な結果が他にも報告されている。<sup>(10) (38)</sup> 一酸化炭素が発生しないことは前章に述べた通りである。 熱分解の場合に、たとえばクラフトパルプ等からは炭酸ガスとともに一酸化炭素がかなり多く発生することが報告されており、<sup>(50)</sup> コロナ劣化の場合に発生しないのは必ずしも反応機構の差異によるものでなく、コロナ放電によりたとえ一酸化炭素あるいは低位の炭化水素ガスが発生したとしても、それらが酸素の存在する放電空間を通る間には気相反応として酸化が行なわれ、炭酸ガスと水とに変換されるものと考えられる。 ただし、オ 2 部に述べる油浸紙絶縁内のボイド放電の場合は典型的な例であるが、本実験においても、容器に絶縁油の蒸気が存在する場合には、コロナ放電によつて油の重合反応が起こり、一種のワックスが試料の放電部の周辺に集積することを経験しており、同様に高真空中の電子衝撃により

表 1.4.1 コロナ放電によつて発生するガスの質量分析計  
による分析結果の一例

( 容器容積約40cc, 片面ガラス, 間隙長 1 mm, 40℃ )

ガス成分	試料	マイラ, 乾燥空气中 715Wh 放電 (相対値)	マイラ, 乾燥窒素中 943Wh 放電 (相対値)
	$m/e$		
	12	12	0
	14	168	197
	15	0	0.5
	16	24	1
	18	3.5	2
	27	0	0.5
	28	6649	7130
	29	54	52
	30	2	0.5
	31	1	2
	32	1.5	0.5
	40	97	3.5
	44	446	9
N <sub>2</sub>		100	100
O <sub>2</sub>		000	000
A		1.6	0.05
CO <sub>2</sub>		6.5	0.12

ポリマーの薄膜が電極に生成されることも報告されている。<sup>(51)</sup> 一方また空気とシクロヘキサンとの混合気中のコロナ放電によりシクロヘキサノンが得られることも知られている。<sup>(52)</sup> このように、コロナ放電によつて起こる化学反応は複雑であつて、炭化水素ガス等がただちに炭酸ガスと水とに変換されると考えることは早計であるが、通常の有機質の固体絶縁材料が、乾燥した空気の十分供給される状態でコロナ放電をうければ気化消耗が起こり、遂には全部が消失してしまい、その場合の発生ガスの主成分が炭酸ガスと水とであること

は一般的特性であるものと考えられる。ただし、この場合に微量な複雑な生成物が、特に炭酸ガスと水とに変換される途中の段階で生じ、これが放電時の絶縁材料の表面状態の変化に寄与していることも考えられる。したがって、ガス分析あるいは発生ガス量の測定を行なつてもただちにコロナによる酸化消耗の機構を解明することはできないが、一方炭酸ガスを定量することは試料の消耗量を測定したことに等価となり、実験上はなほだ便利である。ガス量の測定が減少重量の測定に比して実験法として有利な点としては次のことが考えられる。

- (1) 測定感度が高いために短時間のコロナ放電をさせることにより酸化消耗量を精度よく測定することができる。
- (2) 実験容器からガスのみ取り出して測定することができ、しかもわずかのガス量で一回の実験ができるために、各実験の間に試料の物理的状态ならびに電気回路としてみた状態にも変化がなく、このことは実験精度の向上に有効であり、同時に実験の手数が少なくてすむ。また消耗特性とは別に放電の諸特性も精度よく測定することができ、設計上の必要データをうることもできる利点がある。特に減少重量を求める実験では、実験能率上同一電源に多数のセルを並列に結ぶ場合が多く、放電状態が相互に影響をうける等のことがあるが、ガス測定の実験では個々の実験が短時間でこなえるため、単一実験装置で能率よく実験することが可能であり、実験がより厳密となる。

以上の点より、本章ではコロナ放電による酸化消耗特性を定量的に求めるために、発生ガス量の測定により検討した結果について述

べる。

#### 4.2 実験法

実験装置は図 1.4.1. に示す構造である。ペローズを使用したのは

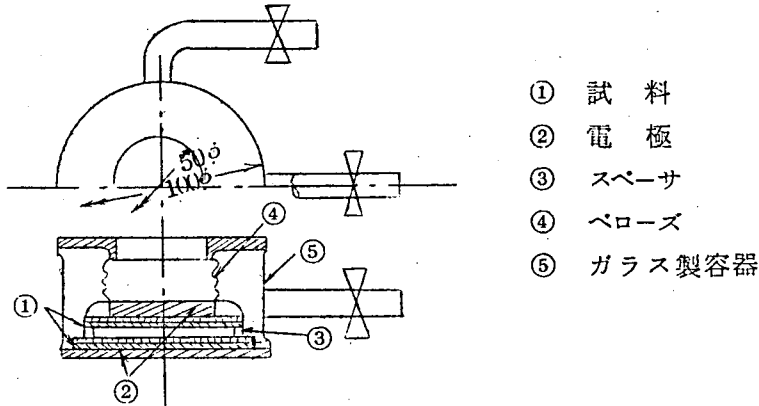
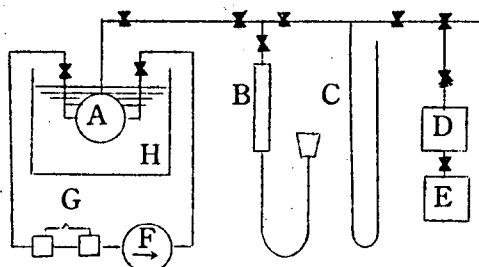


図 1.4.1 ガス発生量測定用実験装置

スペースにより任意の間隙長の実験を簡単に行なうためである。

試料はマイラを使用し、エポキシ樹脂により電極に接着した。なお容器と電極との接合部には P.V.C.シートをパッキングとして使用している。実験は図 1.4.2. に示す接続によつて行ない、容器中には常圧のガスを封入し、一定時間の放電後ガスの循環を行ない、途中にガス吸収剤として五酸化燐ならびに苛性ソーダをおき、吸収される水分ならびに炭酸ガスを吸収剤の重量増加より求めた。この場合、これら吸収剤に吸収されないガスの生成もあるため（オゾン等）、炭酸ガス等を吸収させた後に吸収管内のガスは最初の状態にもどして秤量を行なつた。なお秤量にあつては、実験精度を向上させるために吸収管の表面状態を一定とすることが特に重要であり、この実験では綿布で十分ぬぐい、その状態を同一とすることにより、

0.2~0.3mg程度の測定誤差におさえることができた。したがって、1回の実験には10mg程度の炭酸ガスがあれば実用上十分な精度をうることができ、本実験の一回の所要時間は5~20分である。



- |                                                  |             |
|--------------------------------------------------|-------------|
| A : 実験容器                                         | B : ガス圧力調節器 |
| C : 水銀圧力計                                        | D : ガス乾燥器   |
| E : ガス容器                                         | F : 循環ポンプ   |
| G : ガス吸収管 (NaOH, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) |             |
| H : 恒温油槽                                         |             |

図 1.4.2 実験装置接続図

実験装置のうち、最も問題があつたのはガス循環ポンプである。すなわち、外気と遮断した状態でガスを循環させること自体はさしてむずかしいことではないが、コロナ放電によつてはオゾンが発生し、特に短時間で実験を行なう場合には容器中のオゾン密度も大きく、循環ポンプ内に油がある場合には油がオゾンによつて酸化分解を起こし、分解ガスの一部が吸収剤に吸収され、研究対象とするガスの測定結果に大きな誤差を生ずる。同様に途中の接続管についてもこの点を考慮する必要がある。本実験で使用した循環ポンプは図1.4.3に示す構造のもので、P.V.C.の袋を油によつて膨張ならびに収縮をくり返させるものである。この場合油とP.V.C.中

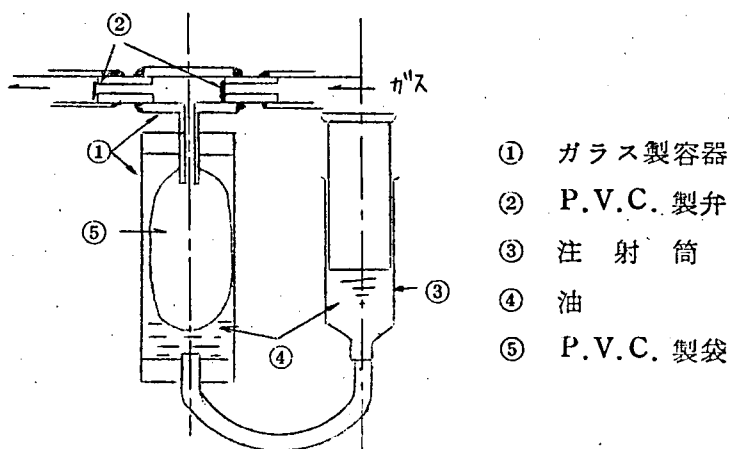


図 1.4.3 ガス循環ポンプ

の可塑剤とが置換することも考えられるが、このことは実験の目的に対しては誤差の原因とならないことを確認している。またオゾンによる P.V.C. の酸化は表面層には起こるが、内部への影響は少なく、<sup>(42)</sup> ある程度の表面酸化をうけた後には、ここで使用したガス吸収剤に吸収されるようなガスは発生しなくなるため、実験は最初予備放電を行ない、この種の誤差の生じないようにしている。接続管には極力ガラスを使用し、可撓性が要求される部分には P.V.C. 管を使用した。なお容器中のベローズ部もオゾンによる酸化を防ぐためシリコン接着剤の塗布を行なった。

予備実験としては試料面上にマイカの薄片を接着し、この状態では放電が起こっても炭酸ガスならびに水分の発生のないことを確認した。ただし、ガスが空気の場合には乾燥状態では苛性ソーダに吸収されるガスの発生はないが、湿気を含む状態で放電を行なった場合には、五酸化燐のみならず苛性ソーダの重量増加が起こる。これ

は水分の存在のもとでは酸化窒素等の酸性ガスが生ずることを示すものであり、有機絶縁材料面上で放電が起こる場合には、たとえ最初は乾燥空気であつても試料の酸化により水分が発生し、結局炭酸ガス以外の酸性ガスが発生するため、アルカリによつて炭酸ガスを定量する方法では誤差が生ずる。特に本実験のように少量の炭酸ガスの測定を行なう場合には誤差が大きくなるものと考えられる。また前章で述べたように、空気中ではコロナ放電により試料表面抵抗等の変動が大きく、この面からも実験誤差あるいはまた実験容器固有の要因の介入が生じやすいので、本実験においては純酸素中ならびに酸素とアルゴンとの混合気中のコロナ放電による絶縁材料の消耗特性の検討を行なつた。空気中の実験を行なう場合には別なガス分析法が必要であり、ガスクロマトグラフ等は実用上有力な方法と考えられる。

#### 4.3 酸素中におけるコロナ放電劣化の実験による考察

##### 4.3.1 放電特性

前節にも述べたように、本実験では同一装置ならびに同一試料状態で異なつた条件の実験を行なうことができるので、放電状態の比較を精度よく行なうことができる。図1.4.4.には間隙長と放電電圧との関係を、また図1.4.5.～図1.4.7.にはそれぞれ放電時の誘電正接、等価静電容量、ならびに放電電力と間隙長との関係を示した。また図1.4.8.ならびに図1.4.9.には放電電圧、ならびに放電電力の温度特性を示した。間隙の放電電圧はブラウン管による電力図形上から求めたものであるが、原点を通らない直線の関係になり、この特性はE.Briner<sup>52)</sup>

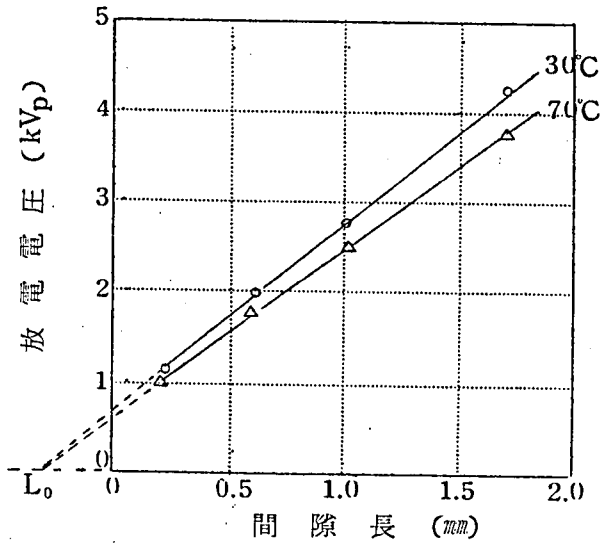


図 1.4.4 間隙長と放電電圧との関係

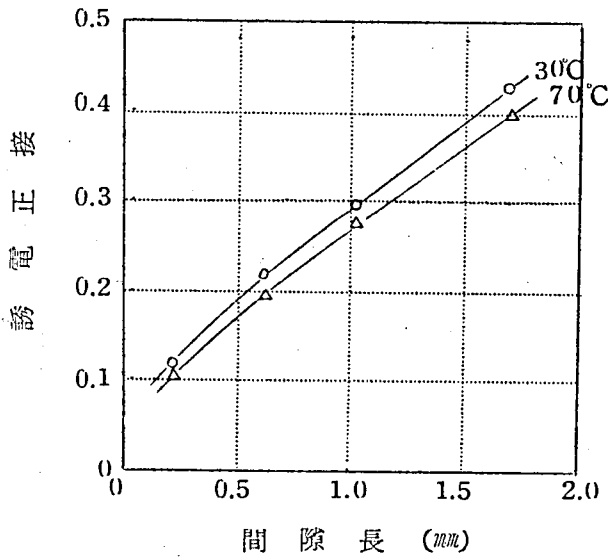


図 1.4.5 間隙長と誘電正接との関係

注) 実験条件 電極:  $50\text{mm}\phi$   
 試料: マイラ ( $0.19\text{mm}$  厚) を両電極に各 2 枚  
 計 4 枚重ねの状態  
 電圧:  $6\text{kV}$ ,  $1.5\text{kc}$



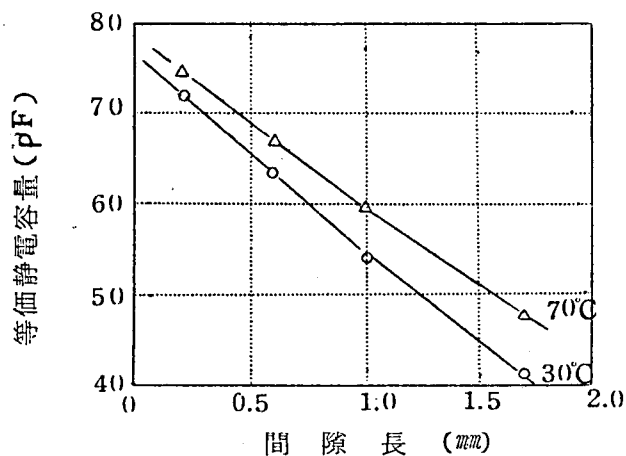


図 1.4.6 間隙長と等価静電容量との関係

注) 実験条件は図 1.4.5 と同じ

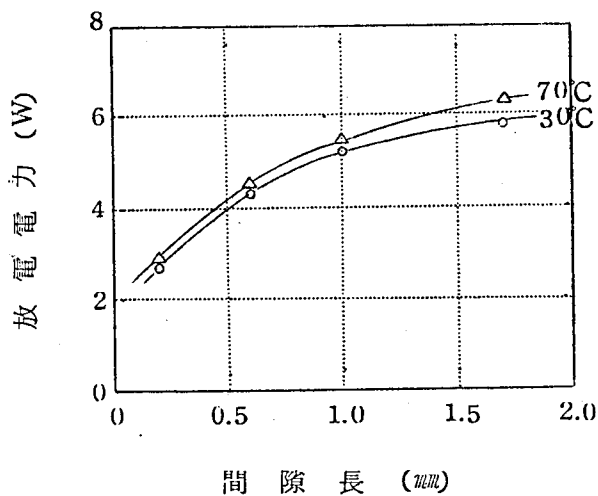


図 1.4.7 間隙長と放電電力との関係

注) 実験条件は図 1.4.5 と同じ

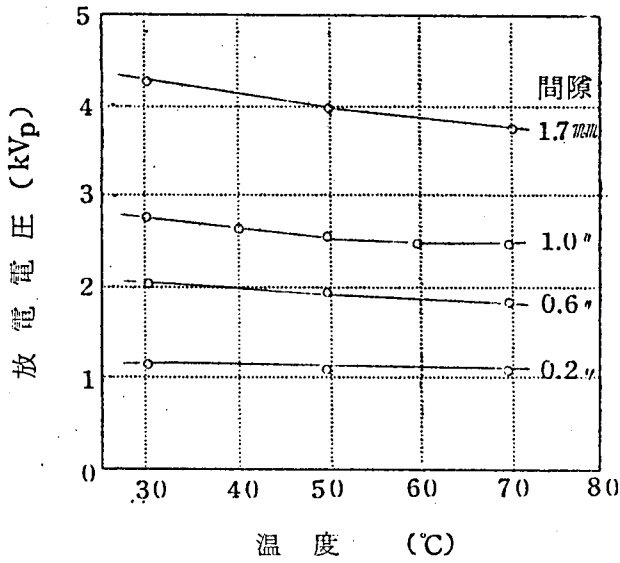


図 1.4.8 放電電圧の温度特性

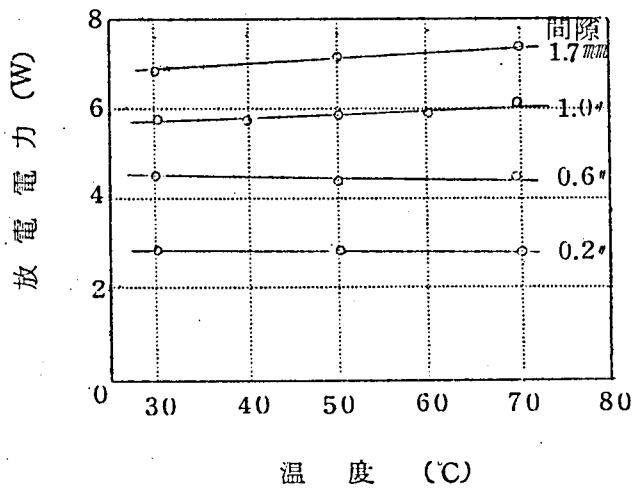


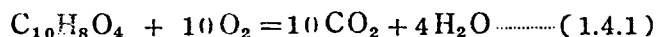
図 1.4.9 放電電力の温度特性

注) 実験条件は図 1.4.5. と同じ

らの実験結果と一致している。放電電力、誘電正接ならびに等価静電容量等は試料の構成ならびに印加電圧等によつて変動するものであり、図 1.4.5～ 図 1.4.7. ならびに図 1.4.9 の特性は、本実験装置の固有の値であるが、これらにより他の場合についても定性的傾向を知ることができる。

#### 4.3.2 コロナ放電によるガス発生特性

マイラが完全に酸化すれば ( 1.4.1 ) 式のような割合でガスが発生するはずである。



炭酸ガスと水分との重量比を求めると ( 1.4.1 ) 式を満足する結果が得られ、また酸素中のコロナ放電による酸化消耗量を直接減少重量から求めた場合と、炭酸ガスを実測し、( 1.4.1 ) 式より計算によつて求めた場合とでは実験誤差の範囲内でよく一致することを確認している。なお、この場合酸素中の酸化速度は、乾燥状態で間隙長 1 mm のコロナ放電に対し、空気中の約 1.8 倍である。したがつて、発生ガスから試料の消耗を求めるには炭酸ガスからでも水分からでも同じような精度が得られるはずであるが、実際には微量水分を求める実験は誤差が大きく、炭酸ガスの定量を行なう方が適當である。

図 1.4.10 に間隙長ならびに温度を変えて、酸素中でコロナ放電をさせた場合の炭酸ガスの発生速度を示した。後述するよう、ガス発生速度は放電時間とともに減少するが、ここに示した値は、放電初期の時間に対して直線的に変動する範囲の値である。印加電圧を変動しても、図 1.4.10 の各場合について放電

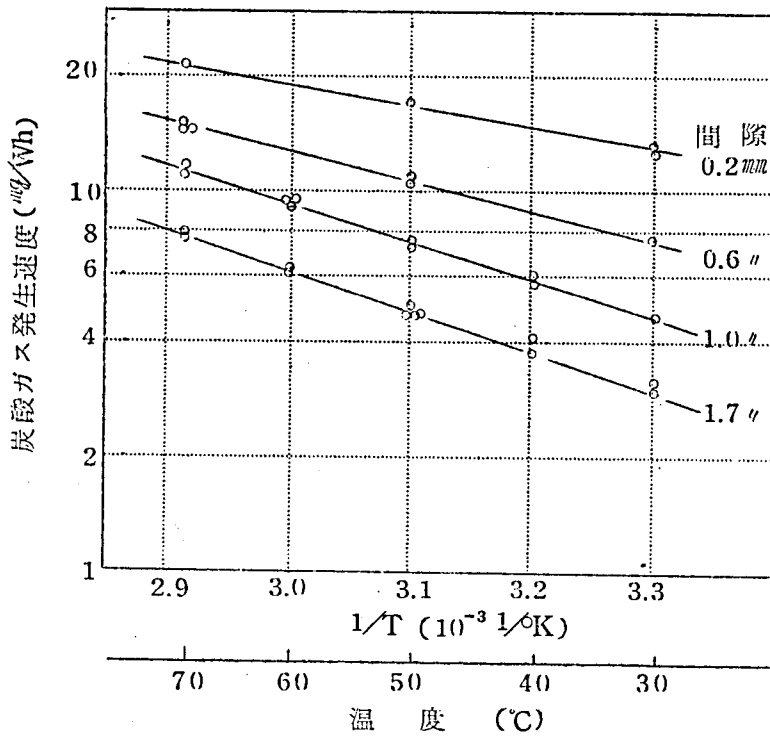


図 1.4.10 酸素中のコロナ放電による炭酸ガス発生速度の温度特性

エネルギーあたりのガス発生量は変動せず、さきに減少重量を求める実験で得た結果を再確認することができた。ただし、0.2 mm 間隙で 70 °C の場合には他と同一の試料構成、すなわち 0.19 mm 厚のマイラを 2 枚ずつ両電極にはり付けた状態では、1.5 kc の電圧 4 kV 以上で実験した場合、単位エネルギー当りのガス発生量が減少するが、これは前章で述べたように放電空間に外部から対流で供給される酸素の量が、酸化によつて消費する量より少ないために起こる現象と考えられる。したがつて、この場合には試料を厚くして（マイラの重ね枚数を多くし）、放電電力を小さくし、放電空間のガス組成がそれほど変化しな

い状態として実験を行なった。 図1.4.10に示す値は以上の点  
さえ考慮すればすべて印加電圧ならびに放電電力に関係のない  
値といふことができる。

#### 4.3.3 コロナ放電による酸化速度の実験式

図1.4.10をみるとよい直線の特性を示し、一般の化学反応の  
速度式が成立することがわかる。 ここでその見かけの活性化  
エネルギーが通常の酸化反応に比して著しく小さいことが特徴  
であるが、これに対し、放電空間で起こる気相反応としての酸化  
反応は放電電流によつてのみ律速され、温度への依存性は認め  
られないことが報告されている<sup>(35)</sup>。 ただし、その場合の放電電  
流は(1.3.8)式で示すような厳密なものではなく、単に電流計で  
測定した値をとつているため、実験の信頼度に若干の問題があ  
るが、放電によつて活性化された酸素により酸化反応が起こる  
場合の反応速度は電流によつて大勢が決まることは一般的に成  
立することと考えられ、後述するように、絶縁材料の消耗も実  
用的には放電電荷量当りの値をとつた方がすべての場合にほぼ  
同一の値をうることができる。 しかし、放電電荷量当りのガ  
ス発生量をとつても見かけの活性化エネルギーは零とはならな  
い。 これは気相反応と異なり、固体絶縁材料が放電の影響を  
うけて活性化される過程は温度への依存性を示すためと考えら  
れる。 しかし、この活性化エネルギーが非常に小さくなる理  
由の一つには、放電時の表面温度の上昇が考えられる。 すな  
わち、放電のエネルギーは大部分が熱として失われるのであるか  
ら、このエネルギーが電子ならびにイオンが試料へ衝突した瞬

時に熱に変換されるとすれば、局部的、かつ瞬間的温度は数百度にも上昇することが考えられる<sup>(6)</sup>。これに対し、図1.4.10の特性は試料の平均温度で表示しているために活性化エネルギーが低くなっているが、これを試料面の瞬間的温度で表示すれば横軸の間隔は縮小され、傾斜は急となる。一例として 1 mm 間隙の場合をとり、温度を約 360°C 高温側に平行移動させて表示すれば、見かけの活性化エネルギーは約 20 kcal/mol となり、通常の熱劣化反応の場合とほぼ等しくなる。しかもこのような表面温度は局部的かつ瞬間的な値としては想像を絶する程の値ではない。

定性的には上記のことが考えられるが、本実験のみでは表面温度を定量的に明らかにすることはできないので、ここでは実用的な意味で図1.4.10の特性の実験式を求めてみる。

図1.4.10の特性を詳しく検討するために、温度範囲を広げ特性曲線を延長すると、図1.4.11に示すように一定の温度  $T_0$  で全部交叉し、この温度は 205°C である。同一温度においても間隙長が大きい場合ほど放電エネルギー当りの試料の酸化消耗の量が小さくなるのは、前章で述べたように放電空間で生じた活性化状態の酸素分子あるいは原子の試料と有効に反応する数は、試料までの距離が大きくなるとともに減少することがその大きな原因と考えられ、 $T_0$  において間隙長の影響が消失することは、この温度では活性化された酸素が空間を移動する間にエネルギーを失って非活性化の状態にもどることがないためと考えることができる。この現象は一見アーク放電等の熱励起<sup>53)</sup>

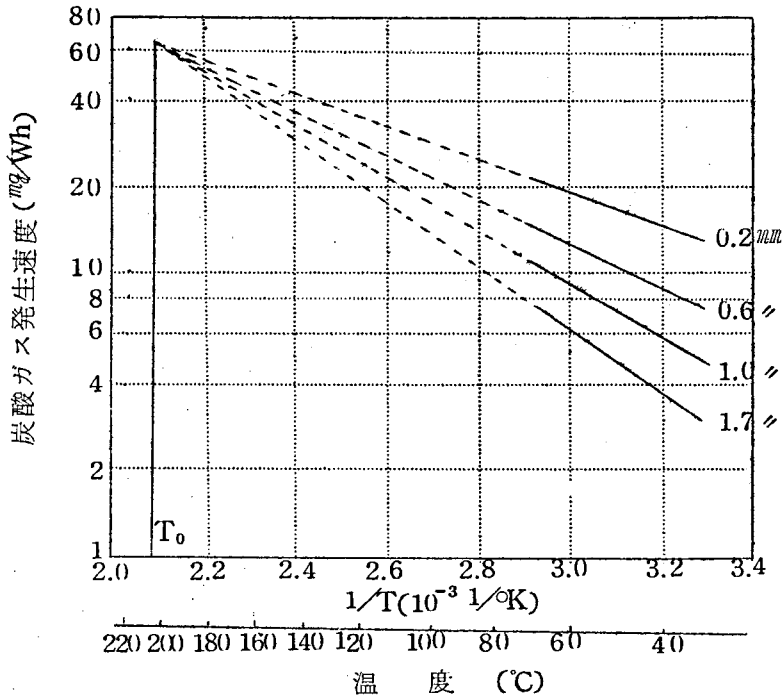
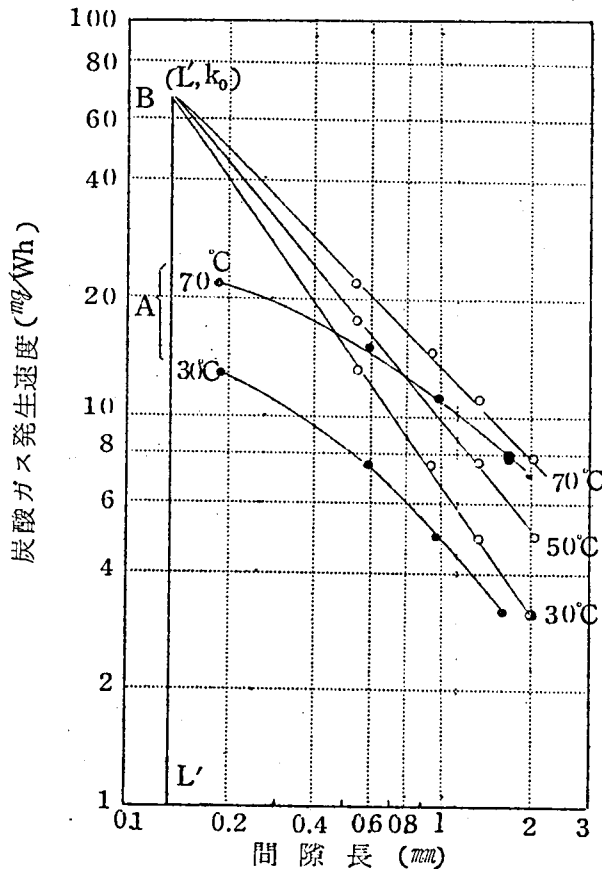


図 1.4.11 炭酸ガス発生速度の温度特性

の状態に似ているが、熱励起の起こる温度は  $10^4 \text{ K}$  以上であつて、さきの  $T_0$  の値  $205^\circ\text{C}$  はこれに比してあまりにも低い値である。ただし、 $205^\circ\text{C}$  は試料の平均温度であり、このときの放電空間ならびに試料表面の瞬時的温度は前述のようになりに高くなることが考えられ、熱励起の起こる可能性は必ずしも零ではないものと考えられる。しかし、実際問題としては  $205^\circ\text{C}$  の実験を行なうことは絶縁材料の変質という点でもむずかしく、また本実験の結果をここまで延ばすことの妥当性にも問題があるため、現段階では  $T_0$  の物理的な意味は明確でないが、実験結果を整理する上ではたいへん便利であり、かつ興味深いものである。

間隙長の影響を明らかにするため図1.4.10を書き直して横軸に間隙長をとつて示すと図1.4.12のようになる。前章で考察したように、単純な指数関数の関係であれば両対数目盛の表示では直線となるはずであるが、ここに示されているように、本実験では直線の特性格が得られていない。このような相違が生じたことに対してはガスが異なること、ならびに実験精度等について考慮することが必要であるが、実験精度では本実験の方が誤差が生ずる原因も少なく、また本実験で得られた放電特性も特異なものとは考えられず、図1.4.12の曲線は酸素中の特性を正しく表わすものであり、コロナによる酸化の基本的特性と考えられる。



A : 間隙長を補正しない特性      B : 間隙長を補正した特性

図 1.4.12 間隙長と炭酸ガス発生速度との関係



図1.4.12をみると間隙長を一定値だけ大きい値とすれば直線が得られることが推定される。ここで補正すべき間隙長の値として図1.4.4の $L_0$ をとり、図1.4.12の特性曲線を $L_0$ だけ平行移動すると図中に示すようによい直線が得られる。またこの直線特性は一点で交叉し、交点の縦軸の値 $k_0$ は図1.4.11の $T_0$ のときの値と一致し、このように $L_0$ を補正值として使用したことは単に図面上の操作で得られる無意味なものではなく、図1.4.13に示すように、間隙の放電電圧とガスの発生速度との関係が両対数目盛の図面上で直線関係となることに対応しているものである。ただし、図1.4.12の直線の交点 $L'$ は $L_0$ より小

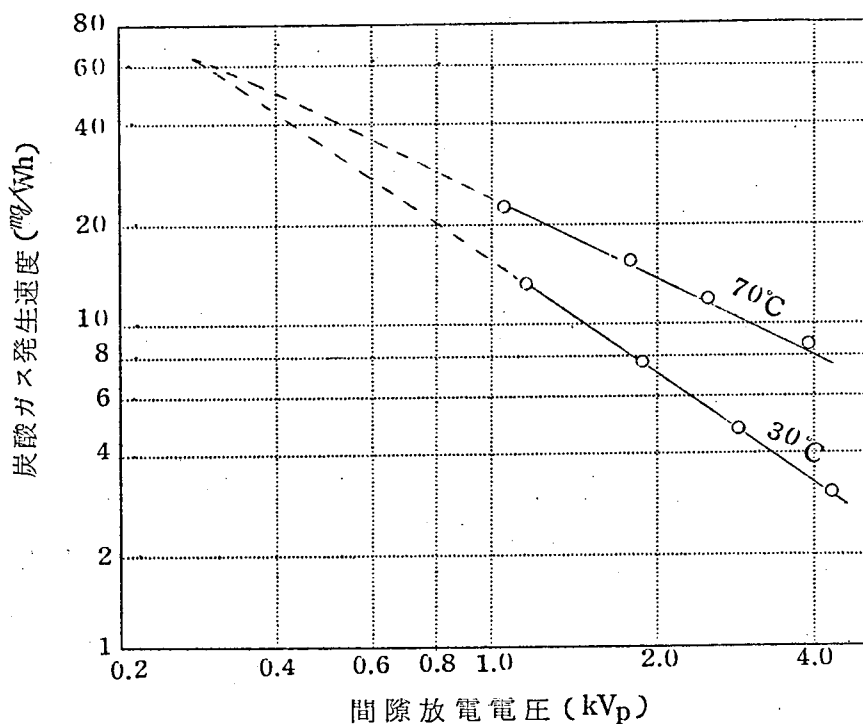


図 1.4.13 間隙放電電圧と炭酸ガス発生速度との関係

さい値であり、実際にはこの状態を実現することは不可能である。したがって、間隙長を非常に小さくした場合にも、コロナ放電による酸化速度が温度に無関係となることはないものと考えられる。このように間隙長の補正を必要とする機構としては図1.4.4.に示すように、間隙長の小さいほど放電の電界強度は大きくなっているため、間隙長の小さい場合には放電が起こること自体に大きなエネルギーを必要とし、単位放電エネルギー当りの活性化された酸素の生ずる割合が減少するものとも考えることができる。この点より、実験式を求めるに当つては図1.4.13のように間隙の放電電圧で表わす方がより本質的と考えられるが、実際問題としては、放電電圧の測定精度は高くなく、また温度によつても変動し取扱いがやつかいとなるので、外部から独立に決定できる量として温度と間隙長とをとつて消耗速度との関係を求めることとした。

図1.4.12において傾斜を $-n$ とすると、単位放電エネルギー当りのガス発生量 $k$ は(1.4.2)式によつて表わされる。

$$k = k_0 \left( \frac{L + L_0}{L'} \right)^{-n} \dots\dots\dots (1.4.2)$$

$n$ と温度 $T$ との関係を求めると図1.4.14のように $1/T$ に対して直線関係が得られ、 $n$ が零となる温度 $T_0$ は図1.4.11の $T_0$ と一致する。図より $n$ と温度 $T$ との関係は(1.4.3)式で表わされる。

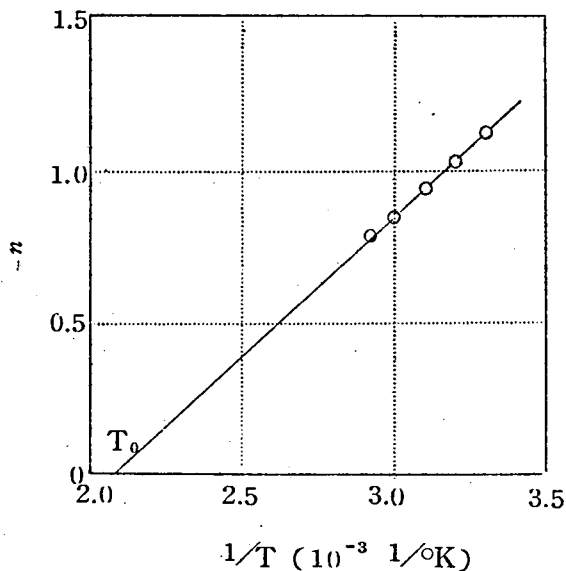


図 1.4.14 炭酸ガス発生速度－間隙長特性(図1.4.12)の勾配の温度特性

$$n = a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (1.4.3)$$

ここに、 $a$ は図1.4.14の直線の傾斜である。(1.4.2)ならびに(1.4.3)式より(1.4.4)式が得られる。

$$k = k_0 \left( \frac{L+L_0}{L'} \right)^{-a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.4.4)$$

(1.4.4) 式において数値を入れると

$$k_0 = 64 \text{ mg/Wh}$$

$$L_0 = 0.35 \text{ mm}$$

$$L' = 0.138 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{T_0} = 2.09 \times 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{K} \quad (T=205^{\circ}\text{C})$$

$$\alpha = 0.915 \times 10^3 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

$$k = 64 \left( \frac{L+0.35}{0.138} \right)^{-0.915} \left( \frac{10^3}{T} - 2.09 \right) \quad (1.4.5)$$

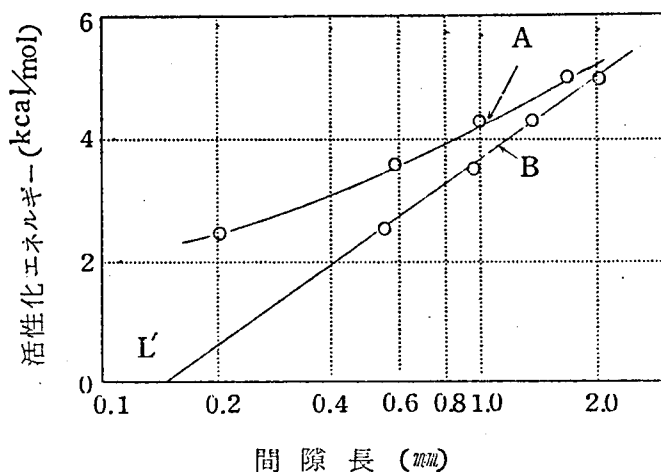
(1.4.4)ならびに(1.4.5)式が酸素中におけるコロナ放電によりマイラから単位放電エネルギー当りに発生する炭酸ガスの量(試料の消耗量)を示す実験式であるが、見かけの活性化エネルギーを求めるために式を変形すると(1.4.6)式が得られ、

$$k = k'_0 e^{-\frac{\alpha R}{RT} \ln \frac{L+L_0}{L'}} \quad (1.4.6)$$

これより見かけの活性化エネルギー  $E_A$  は(1.4.7)式で表わされる。

$$E_A = \alpha R \ln \frac{L+L_0}{L'} \quad (1.4.7)$$

(1.4.7)式を図示すると図1.4.15のA曲線が得られ、これはまた横軸を  $L+L_0$  とすれば直線の特性Bとなる。ここで、放電空間において活性化状態の酸素が生成される反応の特性を含まない試料のコロナ酸化反応の活性化エネルギーとしては、 $L=0$  の場合の  $E_A$  になるものと考えられ、(1.4.7)式より計算すると  $1.68 \text{ kcal/mol}$  が得られる。



A: 間隙長を補正しない特性  
B: " 補正した "

図 1.4.15 酸素中のコロナ放電による酸化反応の活性化エネルギー

次に単位放電電荷量当りのガス発生量を求める。前章に述べたように放電電力  $W$ 、間隙放電電圧  $V_s$  ならびに放電電流  $I_s$  の間には (1.3.8) 式の関係がある。したがって、単位放電電荷量あたりの炭酸ガス発生量  $K$  は (1.4.8) 式より求められる。

$$K = V_s k \quad \text{-----} (1.4.8)$$

$V_s$  と間隙長ならびに温度との関係は図 1.4.4 ならびに図 1.4.8 より求められ、今回の実験の範囲内では直線となるため、実験式を求めることは容易である。数値を入れて実験式を求めると (1.4.9) 式が得られる。

$$K = (-487 \times 10^{-3} T + 3.555)(L + 0.35) 64 \left( \frac{L + 0.35}{0.138} \right)^{-0.915 \left( \frac{10^3}{T} - 2.09 \right)} \quad \text{-----} (1.4.9)$$

ここに、単位は  $K (g/Ah)$ ,  $T(^{\circ}K)$ ,  $L(mm)$  である。

次に実用的な意味で単位放電時間当りの炭酸ガス発生量を求めてみる。ただし、これは電極構成ならびに印加電圧によつて異なり、(1.45)ならびに(1.49)式のように一般的に成立するものとは異なる。今回の実験条件は電極に 7.5 ミル (0.19mm) 厚のマイラを 2 枚接着したものを放電間隙を隔てて向き合わせたもので、電極の大きさは 50mmφ、印加電圧は 6kV, 1.5kc である。図 1.4.7 を書き替えると図 1.4.16 が得られ、ほとんど直線特性となる。この場合温度の影響はわずかであるため近似的には放電電力は温度に無関係とし、前述のものと同様に数値を入れて近似式を求めると単位時間当りの炭酸ガス発生量  $K'$  は (1.4.10) 式のようになる。

$$K' = 3.48 \log \frac{L}{0.031} \times 64 \left( \frac{L + 0.35}{0.138} \right)^{-0.915 \left( \frac{10^3}{T} - 2.09 \right)} \quad (1.4.10)$$

ここに、単位は  $K' (mg/h)$ ,  $L (mm)$  である。

以上求めた実験式を使用して逆に計算を行なつてみる。

(1.4.5) 式から計算すると、これは無理な近似の取扱いをしていないために、当然図 1.4.10 の特性とよく一致する。(1.4.9) 式より求めた値と実験値との比較を行なうと図 1.4.17 のようになる。  $V_s$  の測定精度が低いので、この程度の不一致は実用上やむをえないものである。また (1.4.10) 式の計算結果を図 1.4.18 に示した。ただし、ここで放電空間のガス組成の変化が大きくないものと仮定した値であつて、実際には 0.2mm 間隙で

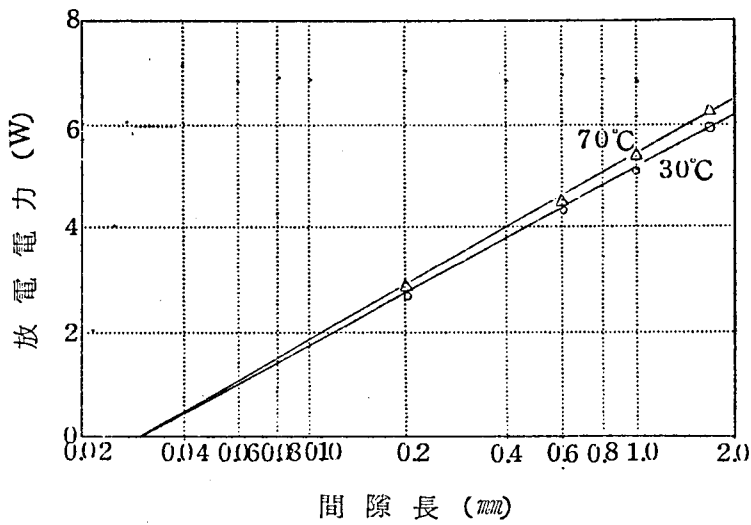
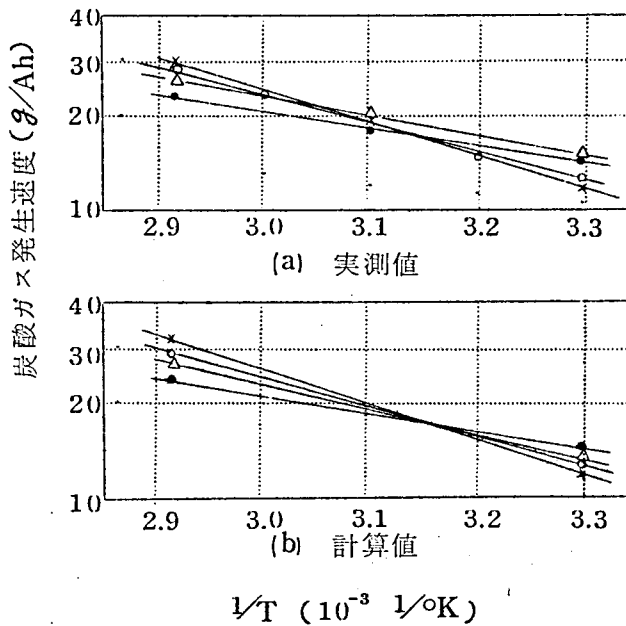


図 1.4.16 間隙長と放電電力との関係



- $1/T$  ( $10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{K}$ )
- x : 1.7 mm 間隙
  - o : 1.0 " "
  - Δ : 0.6 " "
  - : 0.2 " "

図 1.4.17 炭酸ガス発生速度の実測値ならびに計算値

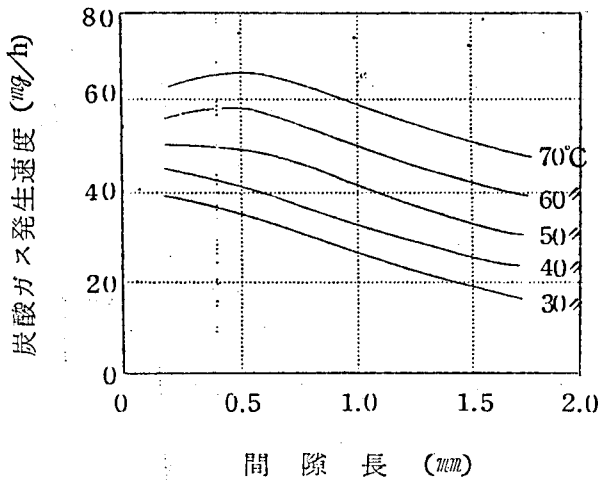


図 1.4.18 炭酸ガス発生速度の計算値

温度 70℃ の条件では図に示すより小さい値となる。(1.4.5) ならびに (1.4.9) 式は印加電圧ならびに試料構成には関係なく、放電部へのガス供給が十分の状態では常に成立する関係式である。

#### 4.3.4 ガス圧のコロナ放電による酸化速度に及ぼす影響

ガス圧力を減少させると放電電圧が低下し、放電が容易に起こるようになる。酸素中のコロナ放電による酸化消耗に対する圧力の影響を示すと図1.4.19のようになる。単位放電エネルギー当りのガス発生量は圧力の減少とともに大きくなるが、電荷量当りの値は圧力に無関係となる。この結果からみれば前節までに考えてきた機構と若干異なり、放電による酸化の速度を決めるものは電子、ならびにイオンの衝突による材料の活性化される過程にあると考えることができるが、後述のアルゴン混合気中の実験結果もすべて含めて考えると必ずしもそのよ



うな単一機軸で説明することは困難である。しかし、詳細な反応機構とは別に実用的な立場となれば、放電電荷量あたりの試料の消耗量、またはガス発生量の方が、放電エネルギー当りの量よりも諸種の実験条件の影響をうけることが少なく、この量で表わすことが実用的には便利である。

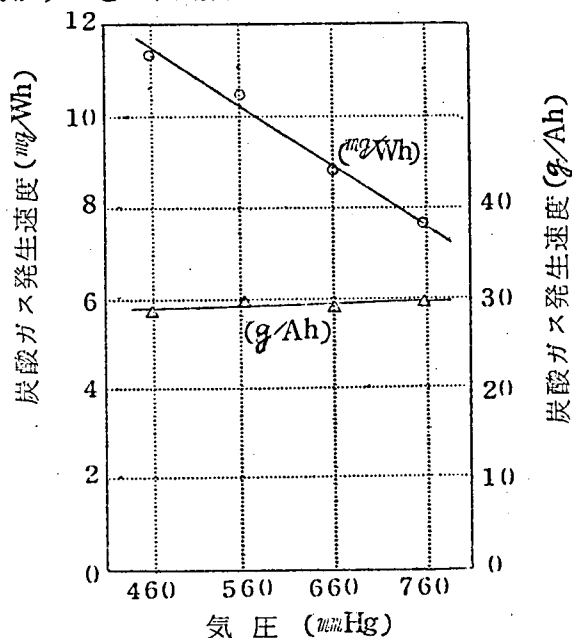


図 1.4.19 ガス圧力と炭酸ガス発生速度との関係

※) 実験条件 同隙長=1.7mm 温度=70°C

#### 4.4 酸素-アルゴン混合気中の実験による考察

##### 4.4.1 放電特性

アルゴンは放電電圧が非常に低いため、これを混合すると放電電圧が著しく低下する。酸素とアルゴンとの混合比を変えた場合の放電電圧を図1.4.20に示した。この場合、混合比は圧力計の読みからできるだけ正確に求めてはいるが、誤差が生じ、単一気体の場合に比してばらつきが大きい結果である。

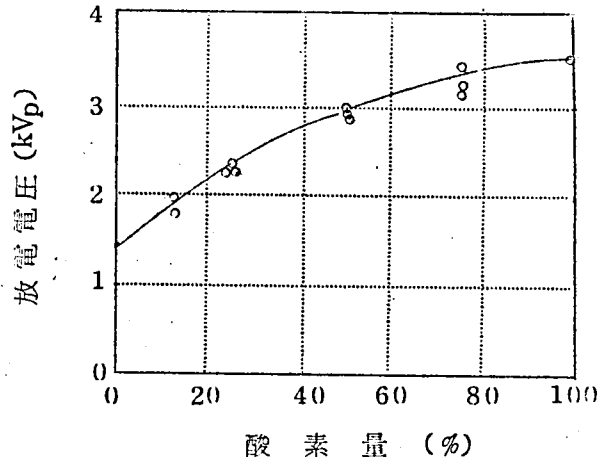


図 1.4.20 酸素-アルゴン混合気中の放電電圧

注) 実験条件, 間隙長: 1.7 mm  
温度: 70 °C

#### 4.4.2 炭酸ガス発生特性

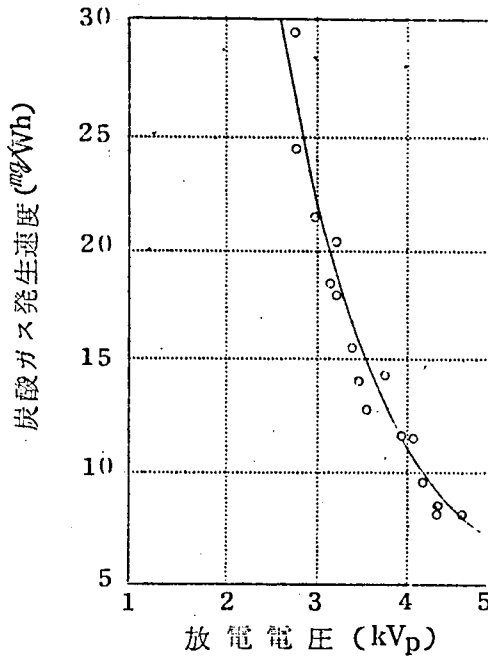


図 1.4.21 酸素-アルゴン混合気中の放電電圧と  
炭酸ガス発生速度との関係

注) 実験条件 間隙長: 1.7 mm 温度: 70 °C

まず混合比とコロナ酸化速度、すなわちガス発生速度との関係であるが、混合比は実験上のばらつきが大きいので、図1.4.21に示すように放電電圧とガス発生速度との関係を求め、これに図1.4.20の関係をを使用して混合比とガス発生速度との関係を求め図1.4.22に示した。アルゴンが多いほど炭酸ガスの発生速度が大きくなっている。ただし、100%アルゴンの場合には前章に述べたように試料の消耗ならびに炭酸ガスの発生はわずかである。図1.4.22の値は放電の初期の値であり、酸素量が少ないほどガス発生速度の飽和が早く起こる。したがって、これ以上アルゴンの混入率が大きい場合の実験は炭酸ガスの検知感度のさらにすぐれたもので行なうことが必要であり、定量的な取扱いは実際的に非常に困難である。

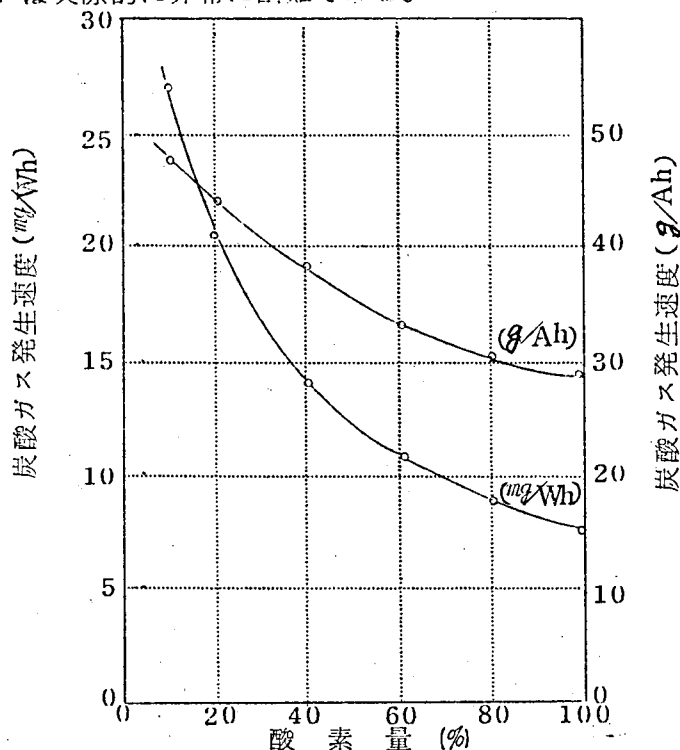


図 1.4.22 ガス混合比と炭酸ガス発生速度との関係

注) 実験条件 向係長=1.7mm. 温度=70℃

次にこれらの温度特性を図1.4.23に示した。酸素中では間隙長を小さくすることにより見かけの活性化エネルギーの減少が起こつたが、本実験では間隙長を一定としてアルゴンの混入率を多くすることによつて放電電圧を下げ、同様な現象が得られた。このことは現象としてはアルゴンの放電電圧が非常に低いために放電間隙に金属等を挿入して間隙長を小さくしたものと等価である。ただし、両者を単に放電電圧で比較したのみ

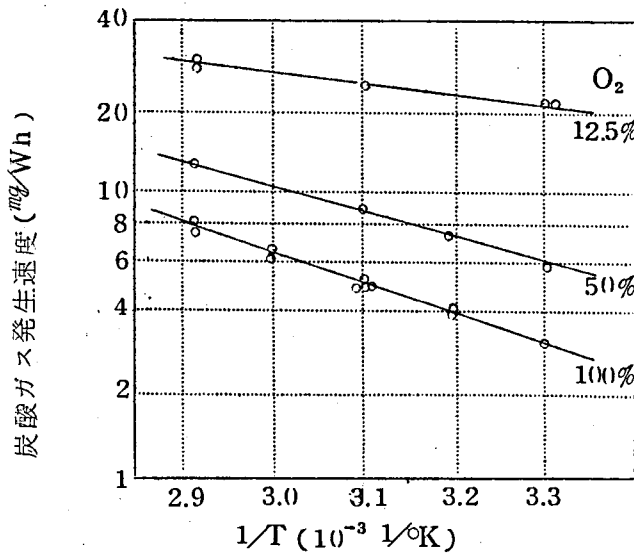
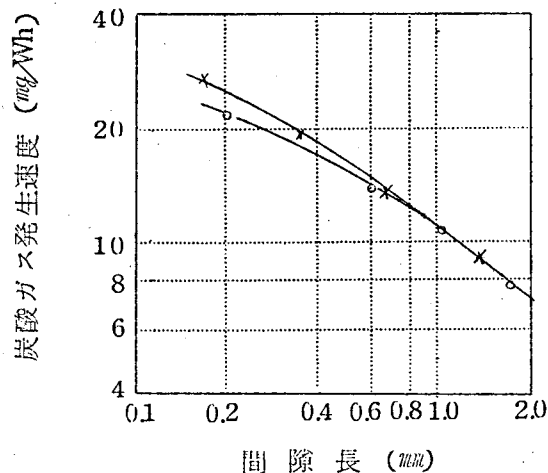


図 1.4.23 酸素-アルゴン混合気中における  
炭酸ガス発生速度の温度特性

では同一の特性を示すことはないが、これはアルゴンの放電電圧が低くとも零とはならないため当然であり、図1.4.24に示すように、放電間隙をアルゴンの混入率だけ減少させ、間隙長の特性和して酸素中の実験結果と比較するとよい一致が得られる。もちろん、このような取扱いによつて両者の一致を求めてもた

だちに反応機構を求めることはできないが、モデル的考え方としては上記の考え方が妥当と考えられる。ここでアルゴンの放電にエネルギーの消費があるにもかかわらず図1.4.24のような結果が得られる一つの理由としては、アルゴンからは容易に電子が生じ、これが活性化状態の酸素を作り出すのに有効であるためと考えられる。このことは単位放電電荷量当りのガス発生量をみれば一層明らかである。すなわち、酸素中の値よりも、図1.4.24から得られる等価間隙の酸素-アルゴン混合気中の放電電荷あたりの値ははるかに大きい値となつている。



x : 酸素-アルゴン混合気中(間隙長補正)  
o : 酸素中

図 1.4.24 酸素-アルゴン混合気中ならびに酸素中の

コロナ放電による炭酸ガス発生速度  
注) 実験条件 温度 = 70°C

#### 4.4.3 酸化反応の反応次数の決定

コロナ放電によつて絶縁材料が酸化消耗する反応は、ガス状態の変化が無視できる場合、たとえば大気中または非常に大きな容器中の実験では、放電時間に比例して消耗量が多くなる線

形の侵食反応であることはすでに述べた通りである。しかし、密閉容器中で実験する場合にはガス成分が変化し、特に酸素は炭酸ガスと水とに変換されて消失する。ここでは酸素の減少する状態について検討した結果を述べる。図1.4.25に放電エネルギーと炭酸ガス発生量との関係を示した。図1.4.22に示

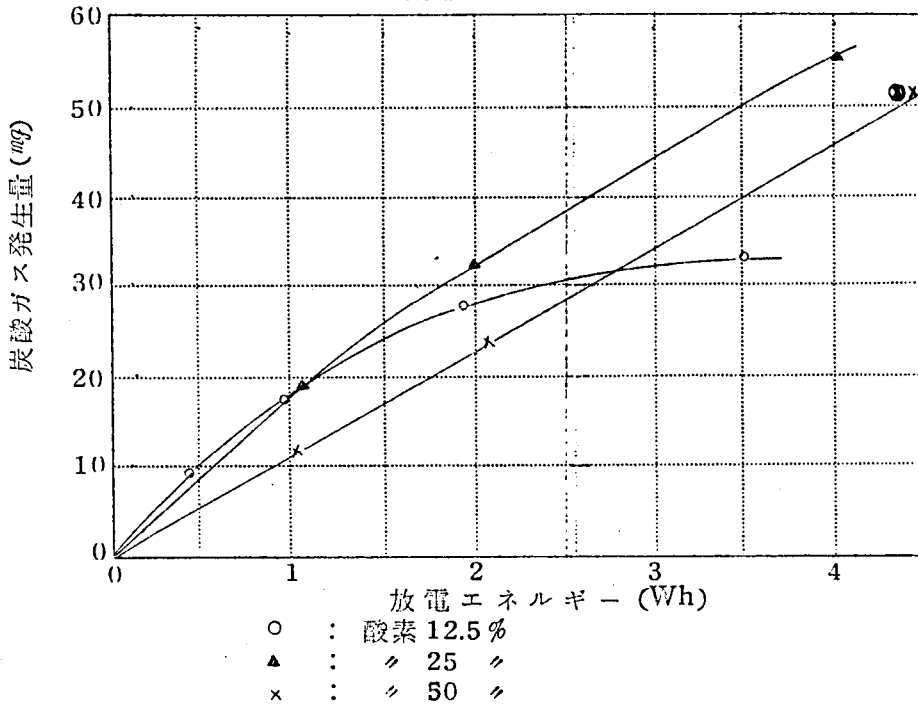


図 1.4.25 放電エネルギーと炭酸ガス発生量との関係

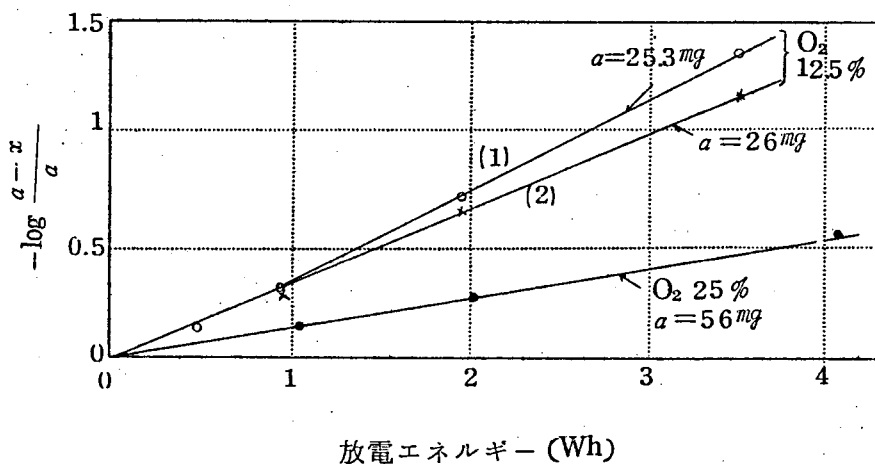
注) ①② は水蒸気圧を制限した場合の値を示す。

(2) 実験条件 内径長: 1.7mm 温度: 70°C

したように、アルゴンの多いほど初期のガス発生速度は大きい、一方酸素の減少が大きいためにガス発生の飽和が早い。酸素の消耗が一次反応として進行するならば(1.4.11)式が成立するはずである。<sup>(54)</sup>

$$-\ln \frac{a-x}{a} = k_1 t \quad \dots\dots\dots (1.4.11)$$

ここに、 $a$  は初期の酸素濃度、 $x$  は時間  $t$  のときの反応量、 $k_1$  は速度定数である。本実験では時間  $t$  の代りに放電エネルギー (Wh) を使用する。 $-\ln \frac{a-x}{a}$  と  $t(\text{Wh})$  との関係が直線で表わされれば一次反応とみなすことができる。図1.4.26にこれらの特性を示した。ただし、この実験では初期酸素量を調整する精度が低く、この値をどのようにとるかによつて特性が若干変化し、図中(1)(2)の特性のような差異が生ずる。したがつて、この実験結果のみによつて正確な一次反応ということとは若干早計のきらいはあるが、酸素の消耗が一次反応であることは常識的結論とも一致するものである。すなわち、アルゴンは放電電圧を低下させ、またコロナ放電の起こつた状態では酸素の活性化を促進させて酸化速度を大きくするが、放電継続



$a$  : 初期酸素量

$a - x$  : 任意時間後の酸素量

図 1.4.26 酸素量の減少特性

とともにアルゴンの量は不変であるにもかかわらず、酸素の濃度は減少するため酸化反応速度も減少したものである。発生ガスとしての炭酸ガスならびに水等は、反応速度に影響を与えないものと考えられる。

#### 4.4.4 水分の影響

前章には、試料の減少重量を直接求める実験において乾燥剤の影響が大きく、水分の存在がコロナ放電による酸化消耗の速度を小さくすることを報告したが、その場合の水分は酸素の酸化物とともに表面に吸着されて表面抵抗を低下させるものであることを推定した。本実験では酸素は存在せず、炭酸ガス以外の酸性ガスは生成されないため水分の影響を比較的明確に検討することができる。すなわち、前項で述べたように、コロナ放電による酸化は一次反応であり、水分の影響は存在しないことが確かめられたが、さらにまたこれを直接的に検討するために、容器内部の水分を制限して実験を行なった。すなわち、この実験は放電容器を油中に入れて行なうが、油より出た部分の温度を油の温度より低くしておく、発生した水分はこの冷たい部分の飽和水蒸気圧に達すると凝縮して容器内部はそれ以上の水蒸気圧に達しない。これに対しこの部分の温度を油温以上に上げておくと、内部の水蒸気は油温における飽和水蒸気圧まで上昇することができる。上部温度を  $25^{\circ}\text{C}$  に押え、水蒸気密度を  $22.9\text{mg/l}$  ( $70^{\circ}\text{C}$  の容器内の相対湿度として  $11.5\%$ ) に制限した場合と、上部を  $70^{\circ}\text{C}$  以上に保つた場合との酸化消耗速度の比較を行なった。図1.4.25中に  $50\%$  アルゴン混合の場合



水蒸気圧を制限したときの実験結果の一例を⊗印で示した。

この実験では水蒸気圧を制限しないときには発生水分により水蒸気密度は  $47.4 \text{ mg/l}$  ( 相対湿度 23.8% ) となつてゐるはずである。両者の結果をみると有意差はなく、また酸素とアルゴンとの混合比を変えた場合にも同様な結果が得られており、水分が放電空間に水蒸気として存在するのみではコロナ酸化速度には影響を与えないものと考えられる。このことは後章に示す A 過程から B 過程へ移行することとも大きな関連をもつことであるが、一般に水分は表面に吸着されて酸となつたときにコロナ劣化に大きな影響を与えるものと考えられる。

#### 4.5 総括

以上により酸素中ならびに酸素-アルゴン混合気中で起こるコロナ放電による絶縁材料の酸化消耗の特性が明らかとなつた。すなわち、酸化消耗速度と温度との関係には通常の化学反応速度式が適用されるが、見かけの活性化エネルギーは熱酸化反応に比して著しく小さい。この原因としては、試料の表面温度は瞬間的にはかなり高く、実際には活性化エネルギーはかなり大きいものであつても、外部温度を標準として特性を求めているために見かけ上小さな値となつてゐることが考えられる。また放電間隔長は小さいほど単位放電エネルギー当りの消耗量は大きいが見かけの活性化エネルギーは小さくなる特性を示している。アルゴンを混入すると、その低い放電電圧のためにコロナ放電による酸化は加速されるが、密閉容器中の実験では酸素の減少によつて反応速度が減少するため、アルゴンの混入率が多いほど酸化によるガス発生の飽和が早く起こること

になる。この際の酸化反応の次数は、酸素濃度のみによつて反応速度が決定される一次反応である。したがつて、水分はガス状で存在するのみではコロナ放電による酸化速度にほとんど影響を与ることなく、空気中で窒素の酸化物等とともに酸を生成し、試料表面の漏洩抵抗を低下させた場合にコロナ劣化特性に大きな影響を及ぼすものであると考えられる。本章で得られた特性はコロナ放電による酸化としての基礎的なものであり、実際に機器がもつとも多く使用される空気中においては、前章にも述べたようにさらに複雑な要因が生ずるものである。各材質についての定量的な取扱いについてはまだ不十分であるが、本章ならびに前章の検討により、コロナ劣化におけるA過程すなわち均一消耗過程についてはその機構が明らかになつたものと考えられる。

## 5. コロナ放電による均一消耗過程より局部的侵食孔進展過程への移行条件についての検討

### 5.1 目的

絶縁物のコロナ劣化に対し、実用的に最も重要なことは絶縁破壊が起こるまでの寿命である。コロナ放電による破壊までの寿命を左右する重要な問題として、前章までに均一消耗過程の機構について検討した結果を述べたが、ここではオ二の重要な問題として、均一消耗過程から局部的侵食孔の進展する段階へ移行する条件について検討した結果を述べる。コロナ劣化の現象は非常に複雑であり、均一消耗過程のさらに詳細な検討ならびに局部的侵食孔ののびる機構の検討等が重要な問題であることはもちろんであるが、実用的に耐

コロナ性のすぐれた絶縁方式をうる目的では両者の劣化機構の移行がどのような条件によつて決まるかということは最も重要なことである。

## 5.2 消耗特性と寿命との関係

オ2章に述べたように、シート状絶縁材料のコロナ破壊実験の寿命は大部分A過程（均一消耗過程）でしめられている。したがつて、消耗特性と寿命との間には当然関連があるものと考えられ、まず最初この点について簡単な検討を行なつた。図1.2.2の電極装置によつて破壊までの寿命に及ぼす温度、ならびに間隙長の影響を検討した結果を表1.5.1に示し、図1.2.1(a)の電極にて求めた間隙長

表 1.5.1 マイラのコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす  
温度ならびに間隙長の影響

(図1.2.2電極使用, 乾燥空气中(シリカゲル入) 70℃, 5 kV, 1.5kc)

電界強度 (kV/mm)	試料厚 (mm)	温 度 (℃)	間隙長 (mm)	寿 命			厚さの 減少量 (μ)	消耗量 計算値 (mg/cm <sup>2</sup> )
				時 間 (min)		放電 エネルギー (Wh/cm <sup>2</sup> )		
				平均値	標準偏差			
36.2	0.076	70	0.2	35.7	13.4	0.505	5.5	5.43
〃	〃	〃	0.6	30.4	8.0	0.700	6.3	5.07
〃	〃	〃	1.0	41.0	11.7	1.052	7.5	5.90
〃	〃	50	1.0	47.5	18.1	1.220	4.45	4.51
〃	〃	30	0.2	56.2	22.8	0.790	4.6	5.12
〃	〃	〃	1.0	80.0	25.8	2.000	5.9	4.60
19.9	0.19	70	0.6	175	71.5	2.160	16.0	15.6

注 (1) 電界強度は放電時には間隙の電圧降下は零となるものとして計算した値である。

(2) 消耗量は酸素中の特性より計算した相対値であり、厚さの減少量と傾向の比較を行なうべきものである。

と破壊までの寿命との関係を図 1.5.1 に示した。 消耗特性と異なり絶縁破壊は局部的現象であるため、結果のばらつきも大きい、表より温度ならびに間隙長にはほとんど関係なく、ほぼ同一量の消耗が起こつた後に、コロナ放電による侵食はB過程に移行し、急速に破壊したものと考えられる。 このことからまた放電時の放電光柱内の電圧降下はわずかであり、<sup>(6)(47)</sup> そのときの全電圧がボイドと直列の絶縁材料に印加されることも推定される。

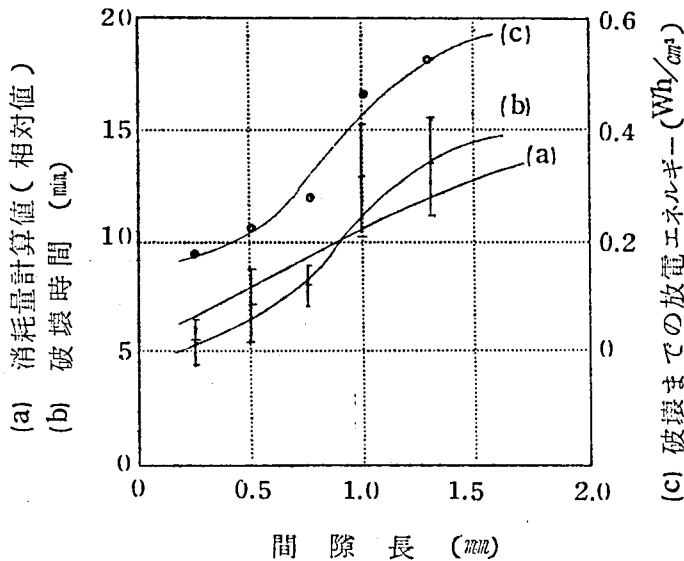


図 1.5.1. 放電間隙長と寿命との関係

注) (1) 実験条件

電 極: 図1.2.1 (a)

試 料: マイラ (0.076 mm 厚)

間隙長: 0.2 mm

雰囲気: 乾燥空気 (シリカゲル入)

電 圧: 4kV, 1.5kc

(2) たて線は破壊時間の標準偏差を示す

図1.5.1 に示すように、金属電極を使用した場合には若干様子が異なり、間隙長の小さい場合の方が破壊までに起こる消耗量が少ない傾向である。このような現象の生ずる一つの原因としては、間隙長により放電様式が変わることが考えられる。すなわち間隙長が大きくなると放電空間内において個々の放電光柱が識別され、しかもそれが移動しているのが認められる。これは間隙長が大きくなれば放電電圧も高くなり、一点で放電が起これば試料面上に生ずる沿面方向の電界も大きくなり、したがって沿面放電による放電の広がりも大きくなつて、<sup>(5)</sup> 個々の放電の表面におけるエネルギー集中度が低減されるためにB過程に移行しにくくなるものと考えられる。このほかにまた金属電極の場合は放電時全電圧は試料にかかるが、図1.2.2の電極では印加電圧はマイカと試料とに分圧され、単に厚さの減少のみでは試料の分担する電圧はそれほど大きくならず、侵食孔ののび始める条件に若干の差が生じたものと考えられる。なおここに示したのはマイラについての一例のみであるが、このような特性は放電電力、試料の消耗特性、ならびに放電空間におけるガスの需給の関係等によつて複雑に変化するため、上述の例はだいたいの傾向を示すに止まるものである。次節以下にこれらについての検討結果を述べる。

### 5.3 乾燥剤の影響

図1.2.1(a)に示す電極装置を使用し、乾燥剤の有無、ならびに乾燥剤の種類がコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす影響について検討を行ない、結果を表1.5.2に示した。乾燥剤の存在することの影響は顕著であり、また酸性ガスを吸収する苛性ソーダの影響が

ほとんどないことより、酸素の酸化物等はガス状で存在してもコロナ劣化に影響を及ぼさないものと考えられる。また水分としては雰囲気中に最初存在したもののみならず、酸化によつて試料から発生した水分の影響も大きいことが示されている。

表 1.5.2 マイラのコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす乾燥剤の影響

(図1.2.1(a)電極使用, 試料厚 0.076 mm, 間隙長 0.5 mm, 4 kV, 1.5kc)

温 度 (℃)	乾 燥 剤	寿 命			厚さの 減少量 (μ)
		時 間 (min)		放電エネルギー (Wh/cm²)	
		平 均 値	標 準 偏 差		
80	なし(大気封入)	10.26	2.02	0.308	4.2
〃	シリカゲル	6.67	1.26	0.200	3.3
〃	五酸化 燐	6.42	1.19	0.193	-
〃	苛性ソーダ	10.69	3.49	0.32	4.3
40	シリカゲル	27.9	9.35	0.79	-
〃	なし(大気封入)	71.3	20.4	2.02	-
〃	なし(乾燥空気封入)	42.6	1.90	1.21	-

注 放電電力は乾燥剤の有無によりほとんど変動しない。

表 1.5.3 には図 1.2.2 の電極装置による実験結果を示したが、この場合にも乾燥剤の影響、すなわち発生水分の影響が大きいことが示されている。

また、表 1.5.4 には酸素中における乾燥剤の影響を検討した結果を示したが、この場合は空気中に比して乾燥剤の影響ははるかに少ないことが明らかである。

表 1.5.3 マイラのコロナ放電による破壊までの寿命に  
及ぼす乾燥剤の影響

(図1.2.2電極使用, 試料厚0.076mm, 間隙長 0.6mm, 70℃, 5kV, 1.5kc)

容器内条件	寿 命 (min)		厚さの減少量 (μ)
	平 均 値	標 準 偏 差	
シリカゲル封入	21.0	5.0	5.5
乾燥空気封入	37.6	7.9	9.0
14℃にて相対湿度 80%の大気封入	74.6	4.7	—

表 1.5.4 マイラの酸素中のコロナ放電による破壊までの  
寿命に及ぼす乾燥剤の影響

(試料厚 0.076 mm, 1.5kc 電圧)

電 極	乾燥剤 の有無	電 圧 (kV)	電解強度 (kV/mm)	間隙長 (mm)	温 度 (℃)	寿 命 (min)	
						平均値	標準偏差
図1.2.1a	あり	4	52.6	0.5	40	8.4	1.8
〃	なし	〃	〃	〃	〃	11.3	4.0
図1.2.2	あり	5	36.2	0.6	70	9.8	4.6
〃	なし	〃	〃	〃	〃	10.1	4.2

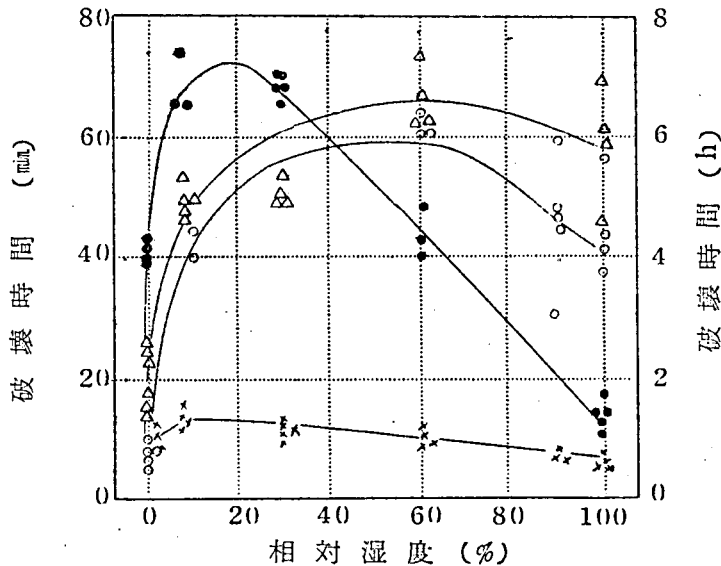
以上の結果は前章までに検討した均一消耗過程の特性と同一傾向であり, 発生水分程度の微量水分がコロナ劣化に及ぼす影響の機構としては, 水分の存在下では窒素の酸化物が生じやすく, これが水分とともに試料表面に吸着されることにより, 表面状態が変化することである。 以上の実験では寿命自体も短く, 消耗速度の差異があるいはまたAからBへの移行が遅くなつたための特性の差異が明ら

かでないが、後述する湿度の影響より、後者の機構、すなわちB過程への移行が遅れるためであることが確かめられている。

#### 5.4 空気中の湿度の影響

まず最初にコロナ放電による破壊までの寿命に対して、劣化空気中の湿気の影響が顕著に認められるものとしてマイラを選び、そのコロナ劣化特性ならびにコロナ劣化機構について検討した結果を述べる。

図1.2.1(a)に示す金属電極装置を使用し、コロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす湿度の影響についての実験結果の一例を図1.5.2に示し、またそれらについて破壊が起こったときの残存厚さの変動を図1.5.3に示した。厚さはマイクロメータで測定したものである。



記号	試料	周波数 (%)	時間表示
○	マイラ (0.076 mm 厚)	1500	min
Δ	マイラ (0.19 mm 厚)	1500	h
●	マイラ (0.076 mm 厚)	150	h
×	フジツク (0.076 mm 厚)	1500	min

図 1.5.2 コロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす湿度の影響

注) 実験条件

電極: 図 1.2.1(a)

間隙: 0.2 mm

温度: 70 °C

電圧: 4 kV



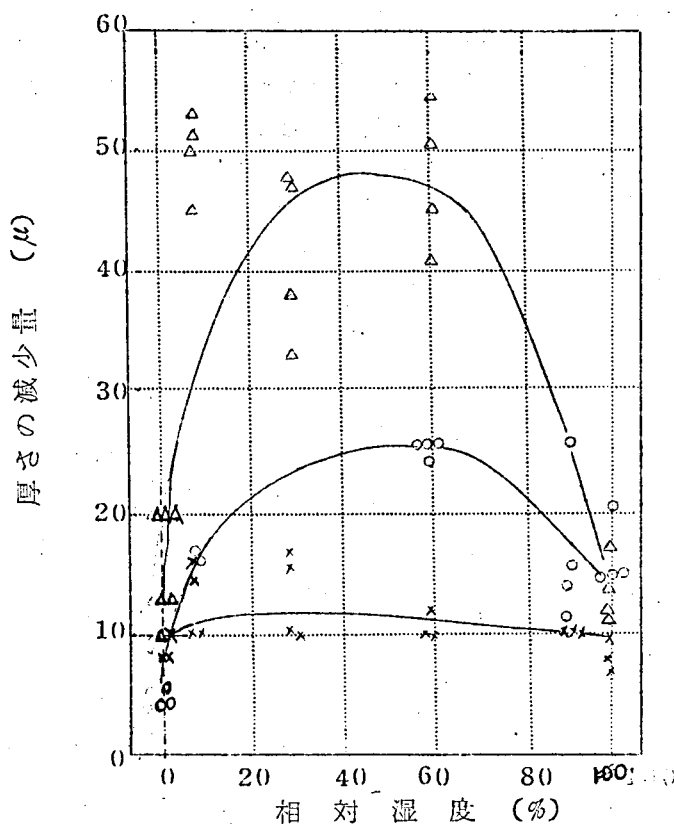


図 1.5.3 コロナ放電により破壊まで起こる厚さの減少量

注) 記号ならびに実験条件は図 1.5.2 と同じ

り、表面が粗れている場合には最も厚い部分の厚さを示し、特に粗れの程度が大きい場合には平均厚さよりかなり大きな値となる（特に 0.19 mm 厚マイラの相対湿度 100 % における試料の凹凸ははげしい）。また表 1.5.5 には間隙長 0.5 mm の場合について同様な湿度の影響を示した。図または表において、湿度 0 % のものは乾燥剤を容器中に入れた場合であり、また湿度の調節は実験容器の下部に硫酸の水溶液を入れ、硫酸の濃度を適当に選んで行なつたものである。

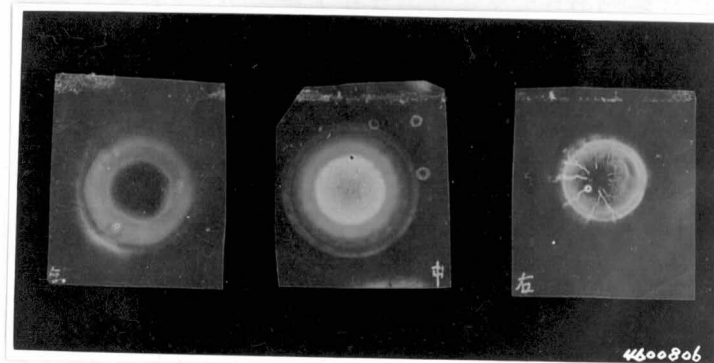
表 1.5.5 マイラのコロナ放電による破壊までの  
寿命に及ぼす湿度の影響

(図1.2.1(a) 電極使用, 試料厚 0.076mm,  
間隙長 0.5mm, 80°C, 4kV 1.5kc)

相対湿度 (%)	寿 命 (min)		厚さの減少量 ( $\mu$ )	放電エネルギー (Wh/cm <sup>2</sup> )
	平均値	標準偏差		
0	6.67	1.26	3.3	0.20
10	45.3	4.54	—	1.35
22	46.2	6.45	17.5	1.39
46	65.0	4.31	25.1	1.99
76	72.1	9.66	28.9	2.50

図 1.5.2 において湿度の影響は電源の周波数によつて変化するが、これは電源周波数が大きくなると放電電力は周波数に比例して大きくなり、放電空間の温度が上昇してその部分の相対湿度が減少するためと考えられる。このことは試料の表面状態をみても明らかである。すなわち図 1.5.4 に示すように 1500%の電源を使用し、相対湿度 100%の場合の実験における破壊点周辺の試料面の状態は、150%の電源により相対湿度 30%で実験した場合の試料面とほぼ同じである。これらの特性より、湿度の影響は相対的なものであり、高周波を使用した加速実験によつては実際の場合の高湿時と等価の実験を行なうことは困難であり、また単に放電間隙ならびに印加電圧を変動させることによつても、放電電力は異なり、湿度の影響も異なることとなる。それらについては後にその特性の顕著なポリエチレンについての検討結果を示す。

破壊までの寿命に及ぼす湿度の影響はマイラの場合特に顕著であ



電源周波数(%)	1500	150	150
相対湿度(%)	100	30	100

図 1.5.4 湿度ならびに電源周波数と表面状態との関係

注) 実験条件 電 極 : 図 1.2.1 (a)  
 間隙長 : 0.2 mm  
 試 料 : マイラ (0.076 mm 厚)  
 温 度 : 70 °C  
 電 圧 : 4 kV, 1.5 kc

るが、破壊までの厚さの減少量をみれば明らかなように、寿命が変動するのは消耗速度が変動することよりも、A過程からB過程に移行する時期の変動したことが主原因と考えられる。

まず、湿度とともに破壊までの寿命が増大する機構について考察してみる。沿面コロナ、あるいはまた側壁のある面積の狭いボイド放電の場合には、高湿時寿命が長くなることが知られており、その場合の原因としては、試料の表面抵抗の低下により電極端近くの電界が緩和されること、あるいはまたボイド放電が起こりにくくなることである。<sup>(19)(20)</sup> しかし、本実験のように試料と離れた電極を使用した場合には、放電電力の減少は起こらず、むしろ湿度とともに若干増大する傾向がある。したがって、B過程すなわち局部的侵食孔

の発生が起こりにくくなるのは放電様式の変化の起こることが原因であるものと考えられる。さきに才2章において、放電をうける試料面に微小な凹みが生ずれば、ここには放電エネルギー密度の集中が起こり、孔が細いほど、また長いほどその集中度が大きく、侵食孔としてのびやすいことを述べたが、実際問題としてはこの凹みの内へのエネルギー集中の機構が重要な問題である。高湿時絶縁材料がコロナ放電をうけて表面抵抗が下がったときを考えると、試料面の不均一等によつて放電が集中し、一部に微小凹みができれば、その部分の間隙長は大きくなるため若干ではあるが放電電圧が上昇する傾向があり、その部分における放電の頻度が減少することになる。その状態で凹みの周辺に放電が起こると、表面抵抗は低くなっているために、放電によつて生じた沿面方向の電界により、表面導電あるいは沿面放電によつて凹みの内へ電荷が供給され、表面が同電位化される。したがつて、間隙長の大きい凹みの中へ放電が起こる可能性はますます減少することとなる。またこの場合凹みの中の電荷密度は大きくなるが、エネルギーとしては図 1.3.19 に示したように、放電点における放電のエネルギーと表面の導電損とになるため、凹みの中における電子ならびにイオンの印加電界方向のエネルギーは乾燥状態の場合よりはるかに小さくなり、結局その部分が侵食孔としてのびる可能性が減少し、均一消耗の過程が長くなり寿命がのびるものと考えられる。

次に湿度の増大とともに寿命が短くなる機構について考察してみる。さきに述べた機構が成立するためには試料の表面抵抗が均一に低下していることが必要であり、表面が不均一な状態となれば別

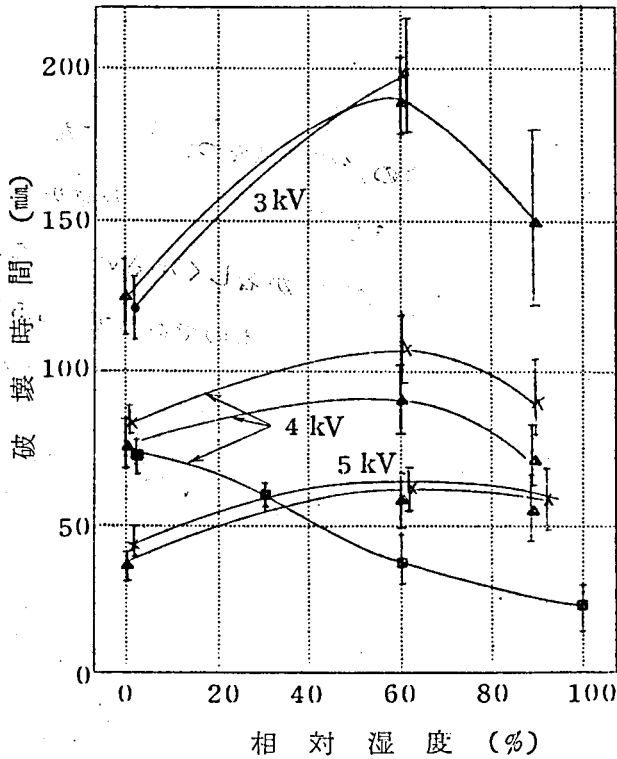
な現象が生ずることとなる。すなわち、ある程度以上の高湿度下でコロナ放電が起これば、試料面には微小な水滴が付着した状態となり、この水滴は窒素の酸化物等により導電性をもち、部分的には導体に近い作用をすることとなる。この状態ではさきに解析した図1.3.19の  $t_1$  より左側の状態となり、1回の放電のエネルギーが大きくなるものである。すなわち、1回の放電は1点においてある面積の電荷を中和するまで継続し、エネルギー密度の大きい放電となつて、試料に局部的損傷を与えやすくなり、結局破壊が起こるまでの寿命が短くなるものと考えられる。なお、この場合図1.3.19よりも明らかなように、放電点周辺の表面導電によるエネルギー損失もかなりの大きさとなるため、試料面全体としてブリッジ等で測定した全放電エネルギー当りの消耗量は、乾燥状態の場合に比してかなり小さくなることは当然である。また上記の考察では1回の放電のエネルギー密度のみを考えたが、破壊までの寿命に対しては同一点に放電が起こる頻度も重要な問題である。すでに述べたように放電のエネルギーは大部分が熱に変換されるため、試料表面では放電のたびごとに水分の蒸発ならびに吸着がくり返され、試料面上に特に水分を吸着しやすい点などが存在しなければ同一点に続けて放電が起こる可能性は少なくなるものと考えられる。ここで図1.3.19に示したように、表面抵抗が極度に低下すれば表面の導電損がかえつて減少する傾向があるため、その場合には放電点の移動の影響よりも放電エネルギー密度増大の影響の方が強調され寿命が短くなるものと考えられる。このような性質は絶縁材料の材質によつて変化することが考えられ、したがつてまた材質により破壊までの寿命に

及ぼす湿度の影響が異なつたものになるものと考えられる。

なお、図 1.5.2 では乾燥時の寿命が電源周波数に逆比例せず、1.5kc の場合の値が著しく小さいが、これは前節に述べたように発生水分の影響によるものであつて、1.5kc の場合には水分の発生速度も大きい、発熱量も大きいために水分の吸着が少なく、表面抵抗が大きくなり寿命が短くなつてゐるものと考えられる。

以上はマイラについての検討結果であるが、コロナ放電による破壊までの寿命に対する湿度の影響と絶縁材料の材質との関係を求めるために、セルローズ トリアセテート、ポリエチレンならびにフルオロカーボン等について図 1.2.1 (a) の構造の電極装置を使用し同様な検討を行なつた。

まずポリエチレンについては低密度のものとしてスミカセン L-70 (住友化学 KK 製) とポリロン (積水化学 KK 製) とについて、高密度のものとしてはショウレックス 6000-50 (昭和油化 KK 製) について検討を行なつた。ポリエチレンの破壊までの寿命と湿度との関係を示すと図 1.5.5 のようになる。なお、ポリエチレンでは試料厚さの均一性はマイラに比して劣り、この実験でも  $\pm 5\%$  程度の変動があつた。この場合個々の実験結果をみると必ずしも試料厚の大きいものの寿命が長いという結果でなく、厚さのばらつきは実験結果のばらつきの主原因ではないことが推定されるが、より合理的な比較を行なうため、試料厚さと放電電力との関係を計算によつて求め、0.1 mm の場合を標準としてそれに対する電力の比を補正係数とし、各測定値にそれに乗じて破壊までの寿命を求めている。また破壊までの厚さの変動は図 1.5.6 のようになり、寿命と対応した特

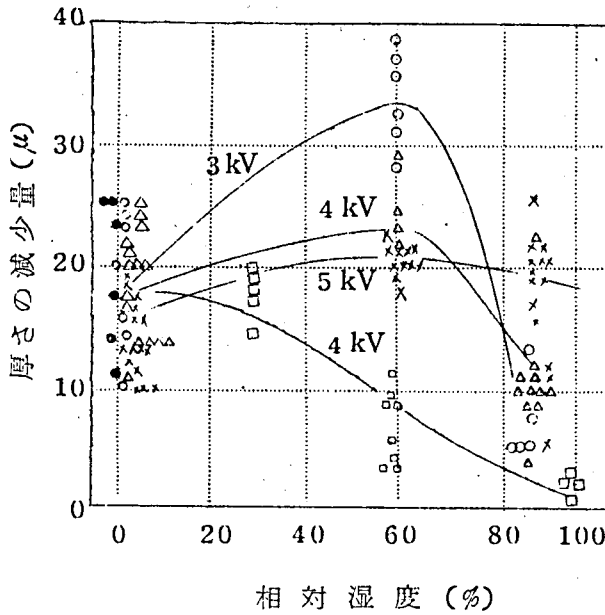


- ▲ : スミカセン L-70
- : ショウレックス 6000-50
- \* : ショウレックス 6000-50 (サントノックス0.3%入)
- : ポリロン

図 1.5.5 ポリエチレンのコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす湿度の影響

注) (1) 実験条件    電 極 : 図 1.2.1 (a)  
                          間隙長 : 0.2 mm  
                          試料厚 : 0.1 mm  
                          雰囲気 : 空 気  
                          温 度 : 70 °C  
                          電 源 : 1.5 kc

(2) たて線は標準偏差を示す。



- |   |         |             |
|---|---------|-------------|
| x | : 5kV印加 | } スミカセンL-70 |
| Δ | : 4 " " |             |
| ○ | : 3 " " |             |
| ● | : 2 " " |             |
| ◦ | : 4kV印加 | ポリロン        |

図 1.5.6 コロナ放電により破壊までに起こる厚さの減少量

注) 実験条件は図 1.5.5 と同じ

性となつている。 この場合にもマイラと同じく湿度とともに寿命が長くなる傾向があり、また印加電圧が高くなると寿命の最大値を示す湿度が高湿側に移行する傾向がみられ、この原因としてはマイラの場合と同じく、放電電力増大により放電空間の相対湿度が低下することが主原因と考えられる。 しかし、放電電力(後節に示す)を考慮しても湿度0%時の寿命がマイラのように短くならないのは、ポリエチレンでは単位放電エネルギー当りの消耗量はマイラに比して小さいが、完全に酸化した場合の水分の発生する割合ははるかに



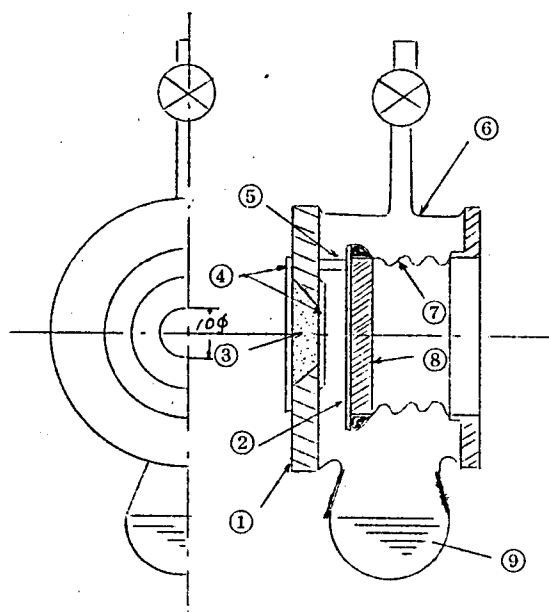
大きくなるため、乾燥時でも試料の表面抵抗が低下し、寿命が長くなっているものと考えられる。

図に示すように、シヨウレックスはスミカセンとほとんど有意差のない特性であり、厚さの変動もスミカセンとシヨウレックスとでは有意差のないことを確認している。ポリエチレンの密度（あるいは硬度）と耐コロナ性との関係については、高密度のものの耐コロナ性が良好であるとするもの<sup>(9)</sup>、あるいはまた両者に差がないとするもの<sup>(10)</sup>等種々の報告があるが、本実験結果よりは差がないと見ることが妥当と考えられ、また実験条件によつて差が生ずるとしても、その差は電子衝撃に対する分子構造上の強さといったような本質的なものでなく、発生水分による表面状態の差異等の二次的な性質の影響によるところが大きいものと考えられる。

ここで特異な特性を示すものはポリロンであり、図に示すように乾燥状態では他と差異はないが、湿度の増加とともに寿命は低下する一方である。寿命が短くなっているのは破壊までの厚さの減少量より明らかなように、ポリロンでは高湿時局部的侵食孔が発生しやすいことが原因である（図には示していないが、相対湿度90%のときの厚さの減少量は他と差はないことを確認している）。結局ポリロンではコロナ放電をうけた場合に局部的に水分を吸着しやすい点が生じやすく、ここに放電が集中したのと考えられるが、このような現象が生ずる原因としては、シート製作時のある種の微量の添加剤によるものか、あるいは組成自体の不均一性によるものと考えられる。しかし、乾燥時の耐コロナ性は他と差がないことより、組成の不均一が原因であるとしても、それはあくまで水分の吸着し

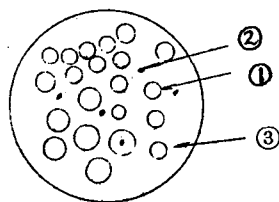
やすさ等のことが原因となつて耐コロナ性に差が生じたものと考えられる。なおポリロンの特性より、ポリエチレン中の添加剤として酸化防止剤が入つた場合の特性に変化が生ずることも考えられるので、シウレックスに酸化防止剤としてサントノックス（アルキルフエノール誘導体）を 0.3 % 添加したものについても同様な実験を行なつたが、図 1.5.5 に示すように、酸化防止剤のないものと特に差はない結果であつた。

以上湿度により放電状態が異なることが寿命に大きな影響を与えることを述べたが、この機構を確かめるために図 1.5.7 の装置により放電の状態の観察を行なつた。乾燥状態では絶縁材料の材質によらず一様に放電空間が明るくなり、放電の不均一性を識別することはできないが、容器中の湿度を大きくした場合には放電が不均一になることが観察される。図 1.5.8 にポリロンの場合の放電状態をスケッチした一例を示したが、この状態は時間とともに不規則に変化し、定量的にこれを解析することはきわめて困難である。しかし、高湿時の放電の不均一性の特徴としては、定性的に次のものをあげることができる。すなわち、オーには放電の強さの変動が数秒ないし数十秒の周期で放電空間全体にわたつて起こり、全体としての明暗をくり返すことであり、次には放電が集中し直径 1 mm 以下の光点となつて放電空間に一様に並び、その位置の変動がゆるやかに起こるものである。次にはもつとも重要なものとして、面積は針先のようにごく狭いがかなり明るく光り、放電のエネルギー密度としては他の部分に比してはるかに大きい点が生ずることである。なお面積の測定はできないが、この点は 0.05 mm $\phi$  以下と考えられる。



- |                  |          |
|------------------|----------|
| ① 絶縁板            | ⑥ ガラス製容器 |
| ② 試料             | ⑦ ベローズ   |
| ③ 低圧電極(水)        | ⑧ 高圧電極   |
| ④ ガラス板(0.14 mm厚) | ⑨ 硫酸     |
| ⑤ スペース           |          |

図 1.5.7 放電状態観察用実験装置

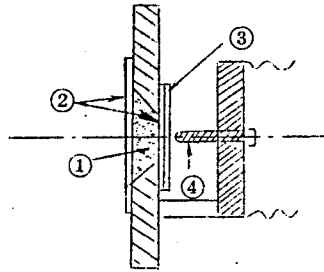


- |                      |
|----------------------|
| ① 光点(比較的大きい面積の放電点)   |
| ② 光点(面積の小さい, 明るい放電点) |
| ③ 暗部(非放電部)           |

図 1.5.8 ポリエチレン上の放電状態観察図

この光点は常時移動するもの、あるいは数秒の間隔で発生消滅をくり返すもの、あるいはまたかなり長時間一点に集中しているもの等があるが、このような放電点が一部分に長時間固定していれば当然その部分より破壊が起こるものと考えられる。しかし、その状態変化に規則性を見い出すことは困難であり、このような不規則性は図 1.5.2 ならびに図 1.5.5 における高湿時の寿命のばらつきの大きいことと対応しているものと考えられる。また、ポリロンはスミカセンに比してこのような放電点の発生が多くなることも考えられるが、実際には両者の特性の差異を放電状態の観察によつて求めることはほとんど不可能であつた。また後節にも述べるが、コロナパルスによつて劣化状態を知ることも、高湿度の場合に対してはきわめて困難であることも明らかとなつた。

なお、本研究では詳細な検討は行なつていないが、図 1.2.1 (b)の針電極を使用し、同一点に放電させる実験においても、湿度と寿命との関係がすでに述べたような特性と類似となることを確かめている。すなわち、湿度増大とともに寿命は長くなり、後ふたたび減少している。この原因を検討するために図 1.5.7 の装置の電極部のみ図 1.5.9 のように変形して、ポリエチレンならびにマイラについて、乾燥時ならびに高湿時の放電状態の観察を行なつた。放電状態はいずれも中心にごく小さく約  $0.1 \text{ mm } \phi$  程度の光点があり、その周辺に  $3 \text{ mm } \phi$  程度の沿面放電があつて、この部分では単一放電の放電図形にみられるような樹枝状の放電が認められる。顕著な特性としては、乾燥時のマイラの場合、中心の光点の状態の変化が認められないのに対し、高湿時のポリエチレンでは中心の光点が若干大きく



- ① 低圧電極(水)
- ② ガラス板(0.14mm厚)
- ③ 試料
- ④ 高圧電極(鋼板)

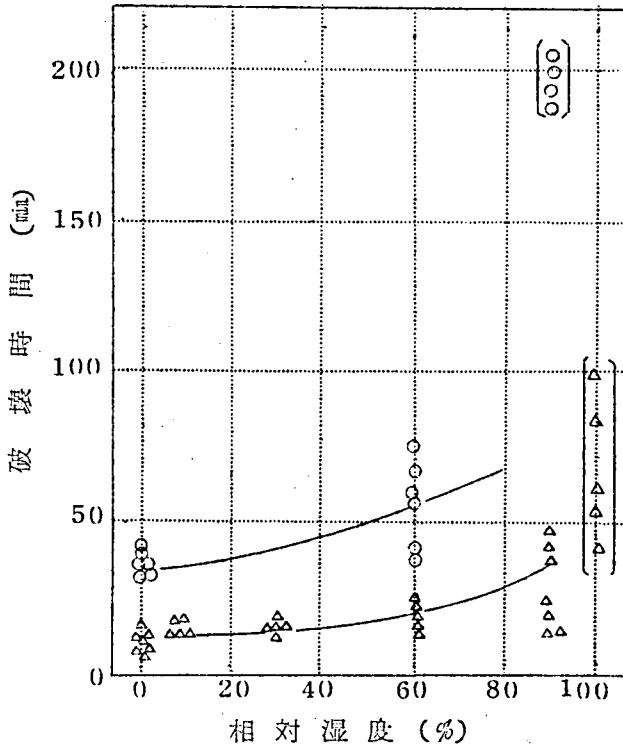
図 1.5.9 放電状態観察用針電極装置

なり、しかもその中で更に小さい光点にわかれ、それらが常に移動していることである。この場合もちろんその分割ならびに移動はごくせまい範囲であり、放電を側面から観察する場合にはそれらを見わけることができない範囲である。このような現象はその程度は少ないが、高湿時のマイラでもみられ、また乾燥時のポリエチレンではごくわずかであるが、類似の現象がみられる。すなわち一見一点の放電とみなしうる場合でも、平等電界の場合に考察したと同様な関係が成立し、放電状態の変化により寿命に変動が生ずることを確認し得たものと考えられる。

セルローズトリアセテートとしてフジタック(富士フイルムKK製)についての同様な実験結果を図 1.5.2 にあわせ示したが、この場合には湿度の影響がそれほど大きくなっていない。マイラの場合と比較すると、電界強度ならびに放電電力はほぼ等しいが、図 1.5.3 よりも明らかなように、この場合には消耗の速度が大きいことが寿

命の短くなっている原因と考えられる。

次にはフルオロカーボンとしてテフロン-FEP (Du Pont 社製) について同様な検討を行なつた。このものはテフロンの新製品であつて(ポリ弗化エチレンプロピレン), ~~従来のポリ弗化エチレンと異なり~~ 透明で, かつ表面は滑らかなものであり, 組成の均一度も従来のものよりすぐれているものである。実験結果を図1.5.10に示した。 図



Δ : 4kV印加      ○ : 3kV印加

図 1.5.10 テフロンのコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす湿度の影響

注) (1) 実験条件    電 極: 図 1.2.1 (a)  
                          間隙長: 0.2 mm  
                          試 料: テフロン-FEP (0.14 mm厚)  
                          雰囲気: 空 気  
                          温 度: 70 °C  
                          電 源: 1.5 kc

(2) [ ] 内の値は放電間隙に水滴が橋絡した場合を示す。

中〔 〕印を付したものは、表面に付着した水滴が電極と試料面とを橋絡し、放電電力が著しく小さくなつて寿命が長くなつた場合の実験値であり、印加電圧が低いほどこのような現象の生ずる湿度の値が低くなつてゐる。これについてはすでに考察したように、発熱量の相異により放電空間の実際の相対湿度が異なることが原因と考えられる。

コロナ放電によつて絶縁破壊が起こるまでの寿命は放電エネルギーで表わすことが妥当であり、それについては後節に述べるが、図 1.5.10 のテフロンについての実験結果でもつとも顕著な特徴は、他の材料に比して著しく寿命が短いことである。テフロンの耐コロナ性がよくないことはすでに常識化した事実であり、その原因としては一般にその組成の不均一性によるものと考えられている。<sup>(6)</sup><sup>(57)</sup> 一方また、T.W.Dakin<sup>(57)</sup> らは弗素の高い電子親和性のため電子衝撃によつて化学結合が切断されやすいものとの見解を発表している。これに対し、前章までに検討したコロナ放電による酸化消耗の特性をみると、テフロンは必ずしも他のものに比して消耗速度は大きくなく、また窒素中のコロナ放電では他の材質と同じく消耗速度は空気中の場合に比して約 1 桁小さくなることも確認している。したがつて、T.W.Dakin らの説を全面的に認めることは不適當と考えられる。また前者の組成の不均一によるという説も、本実験でテフロン—FEP 等の均質なものでも耐コロナ性が他に比して著しく劣るということから、現象のすべてをそれで説明することは困難なものと考えられる。<sup>(58)</sup> これに対し筆者は次に述べるような機構が耐コロナ性に重要な影響をもつものとする。すなわち、テフロンで

はコロナ放電による酸化消耗が起こつても水分の生成はなく、また表面に酸化層が生じにくいために、雰囲気中の湿気を一様に吸着することがなく、放電の局部集中を緩和する作用がほとんど生じないために寿命が短くなるものと考えられる。表面抵抗の測定結果は次節に示すが、本実験でも前述のように放電中異常に大きな水滴が生ずるのは、コロナ放電をうけた面でも水との接触角が大きく、一様に水にぬれにくい性質によるものと考えられる。もちろん、このような性質のみによつてコロナ劣化機構のすべてを説明することは困難であるが、このような材質の二次的性質は、一般に絶縁材料の耐コロナ性に対して重要な意味をもつものと考えられる。

以上述べたコロナ劣化の機構と関連する特性として、マイラについて湿気の存在する場合の放電間隙長と寿命との関係を図1.5.11に

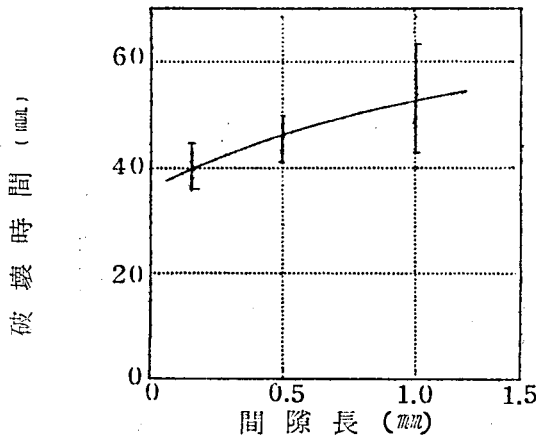


図 1.5.11 高湿時の間隙長と寿命との関係

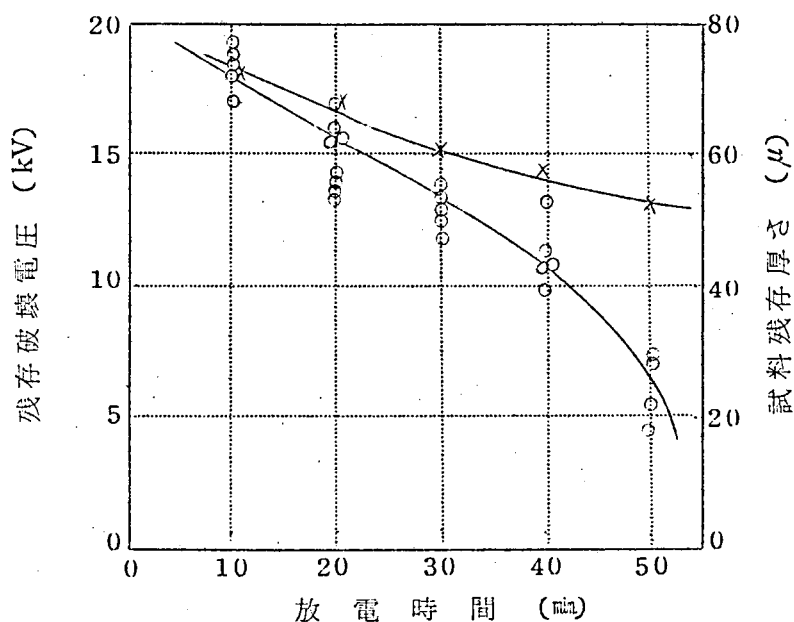
- 注) (1) 実験条件
- |     |                    |
|-----|--------------------|
| 電 極 | : 図1.2.1 (a)       |
| 試 料 | : マイラ (0.076 mm 厚) |
| 雰囲気 | : 空気 (相対湿度 10 %)   |
| 温 度 | : 80 °C            |
| 電 圧 | : 4 kV, 1.5 kc     |

- (2) たて線は標準偏差を示す。



示した。図 1.5.1 の結果と比較すると、間隙長の影響が減少しており、このことはすでに述べたように、乾燥状態では間隙長の大きい場合に放電点における 1 回の放電の面積が広くなり、局部侵食に移行するのが遅れる傾向があるが、雰囲気中に湿気が存在する場合には一様に抵抗が低下して均一消耗の過程が長くなり、このような特性は間隙長にほとんど関係がなくなつたものと考えられる。

次にまた高湿時の放電時間と残存破壊電圧との関係を図 1.5.12 に



○ : 破壊電圧      × : 残存厚さ

図 1.5.12 高湿時の放電時間と残存破壊電圧との関係

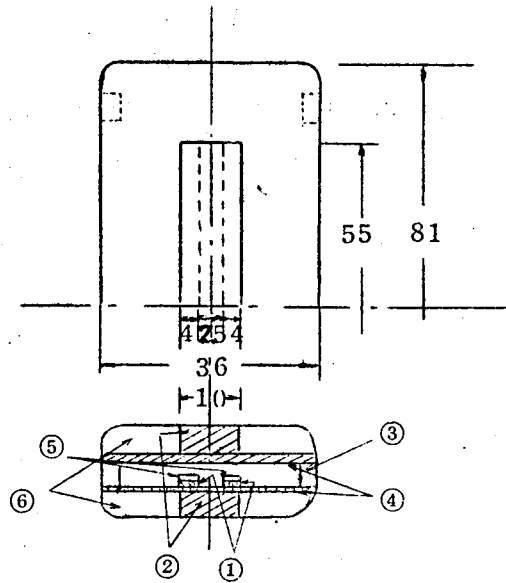
注) 実験条件      電 極 : 図 1.2.1 (a)  
 間隙長 : 0.5 mm  
 試 料 : マイラ (0.076 mm 厚)  
 雰囲気 : 空気 (相対湿度 60%)  
 温 度 : 70 °C  
 電 圧 : 4 kV, 1.5 kc

示した。図1.2.4～図1.2.6の場合には、実験時コロナ放電をさせた電圧よりはるかに高い破壊電圧の範囲から急に低下しているが、図1.5.12に示す高湿時にはかなり低い電圧まで破壊電圧は一様に低下し、その後急に破壊電圧が低下する特性である。この破壊電圧が一様に低下する範囲でも面の状態はかなり粗れてくるが、絶縁破壊を対象とする限りでは均一消耗の過程ということができ、結局前述のように高湿時には均一消耗過程が長くなるものと結論される。なお、ここで図に示す厚さの変動は時間とともに減少率が低下している傾向があるが、これは消耗速度に関係するものでなく、厚さをマイクロメータで測定しているために、測定値は試料の平均厚より大きい値を示しており、減少率の低下は試料面の粗れが次第に大きくなつてゆく状態に対応するものである。

## 5.5 コロナ放電による表面抵抗の変動

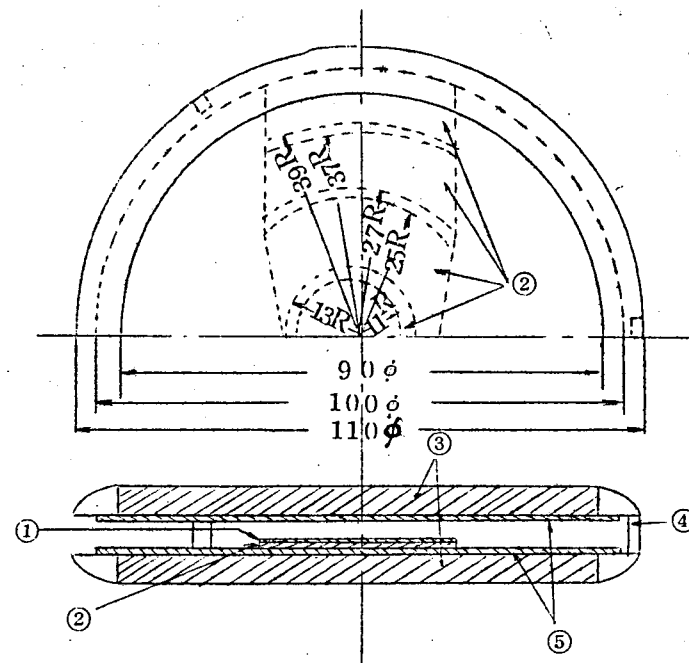
### 5.5.1 実験法

放電時の表面抵抗の測定は図1.5.13に示す電極装置を使用して実験を行なつた。電極を短冊状としたのは外気の流通が十分となる状態についての抵抗値を求めるためであり、外気の流通不十分な場合については図1.5.14に示す同心円状電極装置により測定を行なつた。実験上の問題点は抵抗測定用電極の接着法であり、たとえばシリコングリース等につけるとアルミ箔周辺に付着したグリースを完全に除去することができず、そのまま放電をうけるとシリコンは耐コロナ性が極度にすぐれているため、シリコンの付着した部分だけ変質が起こらず電極の周辺には放電により変化しない部分が生じ、そのまま表面抵



- ① 表面抵抗測定用電極（アルミ箔）
- ② 放電電極
- ③ スペーサ
- ④ 試料
- ⑤ 試料と同一材質の薄膜
- ⑥ 保護絶縁

図 1.5.13 表面抵抗測定用電極装置



- ① 試料と同一材質の薄膜
- ② 表面抵抗測定用電極
- ③ 放電電極
- ④ スペーサ
- ⑤ 試料

図 1.5.14 表面抵抗測定用電極装置

抗を測定すれば大きな誤差が生ずる。また通常の真空グリース等では放電によりグリースよりの放電生成物が試料面をおうようになり、表面抵抗は著しく変動する。一方また金属の蒸着膜をつけて抵抗測定用電極とする場合には、放電実験時この電極上でも放電が起こり、蒸着膜は酸化され導電性を失いこれまた電極としては不適當である。結局アルミ箔にシリコン接着剤をごく薄く塗布し完全に乾燥後所要寸法に切断し、試料上に圧着してこれを電極とする方法により実験を行なった。なお、試料に蒸着膜をつけた上にこのアルミ箔電極をつけたものについても実験したが、両者によつて測定結果に差はなく、単にアルミ箔電極を接着剤により試料に圧着する場合にも電極と試料との間の接触抵抗は一応誤差の原因にはならないことを確認している。なお、抵抗測定電極上には試料と同質の薄膜を接着し(0.01~0.03mm厚)、放電雰囲気の状態、ならびに生成ガス量等が抵抗測定用電極をつけることにより変化しないようにした。またコロナ放電が起こっているときに抵抗の測定を行なうことは困難であるため、抵抗測定用端子は容器外に取り出しておき、放電中はこの部分の電圧をうかせた状態とし、放電を停止させた直後抵抗測定器を接続し、試料の表面抵抗を測定する方法を取った。

#### 5.5.2 空気の流通の十分ある場合の表面抵抗の変動

実験容器中には乾燥剤を入れた状態とし、図1.5.13に示す電極装置により測定した表面抵抗値を表1.5.6に示した。表面抵抗の測定値は非常にばらつきが大きく、絶縁材料の材質相互

表 1.5.6 コロナ放電による絶縁材料の表面抵抗の変動

(図1.5.13 電極使用, 乾燥空气中(シリカゲル入), 間隙長 0.4 mm, 70℃, 1.5kc 電圧)

試 料		印加電圧 (kV)	放電電力 (W/cm <sup>2</sup> )	表面固有抵抗 (Ω)			
上 側	下側(測定側)			0.5 分値	1 分値	2 分値	放電後約5時間乾燥後(1分値)
マイラ (0.19mm厚)	マイラ (0.19mm厚)	3.5	0.123	$2 \times 10^{15}$	$4 \times 10^{15}$	—	$5 \times 10^{15}$
ポリエチレン(0.2 mm厚)	ポリエチレン(0.1 mm厚)	3.5	0.250	$5 \times 10^{12}$	$6 \times 10^{12}$	—	$1.3 \times 10^{14}$
マイラ (0.19mm厚)	ポリエチレン(0.1 mm厚)	4.0	0.370	$1 \times 10^{13}$	$14 \times 10^{13}$	$2 \times 10^{13}$	$5 \times 10^{14}$
P.V.C. (0.3 mm厚)	ポリエチレン(0.1 mm厚)	3.5	—	$32 \times 10^{13}$	$8 \times 10^{13}$	—	$5 \times 10^{14}$
テフロン (0.3 mm厚)	ポリエチレン(0.1 mm厚)	3.5	—	$1 \times 10^{13}$	$14 \times 10^{13}$	$22 \times 10^{13}$	$4 \times 10^{14}$
ポリエチレン(0.1 mm厚)	テフロン (0.3 mm厚)	3.5	—	$10^{16} <$	$10^{16} <$	$10^{16} <$	$10^{16} <$

注 放電を受ける前はいずれの場合も  $10^{16} \Omega$  以上である。

の特性の比較も抵抗値の桁を比較できる程度である。すなわち、コロナ放電をうける前の表面抵抗はほとんど差異がない状態として実験を始めても、コロナ放電をうけると表面抵抗の変動に2～3桁の差異は簡単に生ずる。これは放電開始前に試料に吸着されていた微量水分の影響が拡大されて表われたものと考えられ、試料表面の水分の吸着と窒素の酸化物の生成ならびに吸着とは連鎖反应的に起こることが推定される。表に示した値は、実験前十分乾燥したものについての測定結果中、もつとも再現性の得られる結果の代表例を示したものである。またこの測定値は放電を停止した直後の値であり、これにはコロナ放電によつて表面に残存するイオンの量も関係し、また電解質等による導電も関係することが考えられ、前節で述べた放電中に電荷の表面移動が起こる量との数値的関連性を求めるのは困難であるが、定性的には一応比例的関係があるものと考えられる。

表より、実験容器中には乾燥剤が存在するにもかかわらず、コロナ放電をうけると表面抵抗は低下することがわかる。ポリエチレンはマイラに比して抵抗の低下が大きい、これはすでに述べたように水分発生速度の差として説明することができる。なお、ここで使用したポリエチレンはポリロンであるが、抵抗値はスミカセン等と有意差はなく、これは抵抗値が平均的な性質に関係することより当然である。また表面抵抗は放電空間の対向面の性質によつても変動し、才3章で述べたポリエチレンとマイラとを向き合わせて放電させた場合の特性をこの

表面抵抗の差異により説明することができる。すなわち、対向面の水分発生速度の影響を受け、2種の材質を組合せた場合には各単独の場合の中間の抵抗値となり、消耗量もこれと同様な特性となるものである。

P.V.C. ならびにテフロン等では分子内にハロゲンを含有しており、ポリエチレン等の水分を発生しやすい材質と組み合わせてコロナ放電を起こさせた場合には、塩化水素あるいは弗化水素等の酸性ガスの生成が考えられるが、ここで行なつた実験ではその量はわずかであるらしく、表面抵抗への影響は認められなかつた。

コロナ放電によつて表面抵抗が低下するのは、乾燥状態下では大勢は一時的な現象であり、コロナ放電停止後放置すれば表面抵抗は大幅に回復する。ただし、ポリエチレンでは放電をうける前の状態までは回復しないし、またマイラ等でも完全に回復することはない、これは単に乾燥では除去できない放電生成物が残るものと考えられる。実際の高圧絶縁中のボイドでは、電圧印加中に不規則に放電の発生停止をくり返すことが知られているが、<sup>(45)</sup>これは放電によつてボイド内面、特に側壁の表面抵抗が低下して放電が停止し、放電停止中に抵抗は増大し、ある時間の後には十分大きい値に達してふたたび放電が起こるものと考えられる。

### 5.5.3 空気の流通に制限がある場合の表面抵抗の変動

次に図1.5.14に示した電極装置により求めた表面抵抗測定値を表1.5.7に示した。印加電圧は放電間隙の両面の材質がマ

表 1.5.7 空気流通の不十分な場合のコロナ放電による表面抵抗の変動

(図1.514 電極使用, 乾燥空气中(シリカゲル入), 間隙長 0.4mm, 70°C, 1.5kV電圧)

No.	試料		印加 電圧 (kV)	放電 電力 (W/cm <sup>2</sup> )	表面固有抵抗 (Ω)					
	上側	下側(測定側)			飽和値		約30分後 (1分値)	2時間間隔測定値		放電後約5時間 乾燥後(1分値)
					0.5分値	1分値		0.5分値	1分値	
1	マイラ(0.19mm厚)	マイラ(0.19mm厚)内	3.5	0.123	$2.4 \times 10^{11}$	$3.4 \times 10^{11}$	$4.8 \times 10^{13}$	$2.8 \times 10^{13}$	$3.2 \times 10^{13}$	$4 \times 10^{15}$
	〃	〃 中	〃	〃	$6 \times 10^{13}$	$8 \times 10^{13}$	$2 \times 10^{14}$	$8 \times 10^{13}$	$1 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{15}$
	〃	〃 外	〃	〃	$1.1 \times 10^{14}$	$1.3 \times 10^{14}$	$5 \times 10^{14}$	$2.5 \times 10^{13}$	$3 \times 10^{13}$	$2 \times 10^{14}$
2	ポリエチレン (0.3mm厚)	ポリエチレン (0.3mm厚)内	5.0	0.125	$5.2 \times 10^8$	$9 \times 10^8$	$5 \times 10^9$	—	—	$3 \times 10^{13}$
	〃	〃 中	〃	〃	$4.4 \times 10^{10}$	$4.4 \times 10^{10}$	$4 \times 10^{10}$	—	—	$3 \times 10^{13}$
	〃	〃 外	〃	〃	$5.2 \times 10^{10}$	$6 \times 10^{10}$	$6 \times 10^{10}$	—	—	$6 \times 10^{12}$
3	ポリエチレン (0.3mm厚)	マイラ (0.19mm厚)内	4.0	0.110	$1.8 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{11}$	$4 \times 10^{11}$	—	—	$7 \times 10^{14}$
	〃	〃 中	〃	〃	$1.2 \times 10^{12}$	$1.6 \times 10^{12}$	$5 \times 10^{12}$	—	—	$10^{16} <$
	〃	〃 外	〃	〃	$6.8 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{14}$	—	—	$2 \times 10^{15}$

注 1. 初期の表面固有抵抗はいずれの場合も  $10^{16} \Omega$  以上である。

2. No 1 の飽和値の欄に示した値は約 20 分間隔で測定した値であり, 他とは若干意味が異なる。



イラの場合に中央に約  $40\text{ mm } \phi$  の酸素不足部，すなわち消耗速度のごく小さい部分が生ずるような放電電力の値となるように選んだものである。他の材質の場合には、放電電力がそれにたい等しくなるような電圧を印加しているが、両面ポリエチレンの場合には、表面状態が部分的に変化することは認められないし、またマイラとポリエチレンとを向き合わせたものでは中央に約  $10\text{ mm } \phi$  の酸素不足部が生じ、これらの現象はマイラとポリエチレンとの消耗速度の差によつて放電空間内のガス組成が変化したために生じたものと考えられ、両面マイラの場合が、絶縁材料の酸化消耗の速度が大きく、酸素不足の程度がもつとも大きかつたものと考えられる。

まず両面マイラの場合の測定結果についてみると、さきの空気の流通が十分あつた場合と著しく異なつた結果が得られている。すなわち空気の流通が十分の場合には、コロナ放電がある程度続けば表面抵抗はほぼ一定値となり、数回にわたつて測定する場合に、測定を行なう間の放電させる時間の大小によつては抵抗値に差異はないが、空気流通が不十分の場合には測定の間隔によつて抵抗値が大きく変動するものである。すなわち、たとえば全放電時間は十分長くとも、10 分間放電させてその直後に測定という動作をくり返す場合と、30 分間放電させてその直後測定という動作をくり返す場合とでは抵抗値が大きく変動することが認められる。これは一回の測定には数分を要し、この間放電は止めておくため、放電空間には空気の入れ替えが起こり、酸素が補給され、同時に生成ガスは外部へ拡

散し), 放電時間が短いとその影響が次の測定時に現われることとなるが, 放電時間が長くなると最初の空気の影響が消失し, 発生ガスの拡散, ならびに空気の補給が定常状態となつたときの表面抵抗の定常値が測定されるためと考えられる。表に示すように, 試料の位置については内外の中間部で抵抗が大きくなつており, さきに才 3.7 節に述べたように, この部分では消耗速度も大きくなりまた B 過程への移行も早い, その原因は表面抵抗が他の部分に比して高いためであることを確認することができた。なお, 表 1.5.8 には図 1.5.13 の電極装置において, 周辺を樹脂でかため密閉ボイドとした場合の表面抵抗の測定結果を示したが, 抵抗値の低下は表 1.5.7 の場合より少なく, 外気から遮断されればコロナ放電による酸化も起こりにくいことが示される。したがつて, 表 1.5.7 No. 1 において, 20 分間隔の測定値が非常に低くなるのは, 抵抗測定時に補給された分だけの酸素によつて抵抗値が小さくなつてゐるのみならず, それが一種の連鎖反応の初期状態を作つて放電中に補給される酸素も関与して低抵抗物質が生じてゐるためと考えられる。

表 1.5.8 密閉ボイド内のコロナ放電による表面抵抗の変動

( 図 1.5.13 電極使用, 間隙長  $0.4\text{ mm}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$ ,  $4\text{ kV}$ ,  $1.5\text{ kc}$  )

試 料		表面固有抵抗飽和値 ( $\Omega$ )		
上 側	下側 (測定側)	0.5 分 値	1 分 値	放電後約 5 時間 乾燥後 (1 分値)
マイラ ( $0.19\text{ mm}$ 厚)	マイラ ( $0.19\text{ mm}$ 厚)	$2.8 \times 10^{13}$	$2.7 \times 10^{13}$	$2 \times 10^{14}$
ポリエチレン ( $0.2\text{ mm}$ 厚)	ポリエチレン ( $0.1\text{ mm}$ 厚)	$1 \times 10^{12}$	$1.4 \times 10^{12}$	$2 \times 10^{14}$

注 表面固有抵抗初期値は  $10^{16}\Omega$  以上である。

両面ポリエチレンの場合ならびにマイラとポリエチレンとの組合せの場合には、上記のような現象はみられないが、いずれも表 1.5.7 の値は空気流通の十分な表 1.5.6 の場合よりかなり低い値となつている。特に両面ポリエチレンの場合には抵抗の低下は著しく、また放電停止後乾燥による回復もわずかであり、空気の流通が十分ある場合とは異なつた反応が起こることも考えられる。事実放電後の試料面にはねばい放電生成物が生じているのが認められる。ポリエチレンよりの生成物は蓚酸であるとの報告<sup>28</sup>もあり、筆者もポリエステル等の実験でそれらしい結晶質の物質が生ずることを認めているが、ここで生じた物質は外見上異なつたものであり、今後の検討が必要である。このように抵抗が低下することは実用的に有効な性質とも考えられるが、一方抵抗値が若干不安定でもあり、これは表面が均一でないことを意味し、実際には寿命にほとんど影響を及ぼさないと考えることが妥当である。また、このような空気流通に制限がある場合でも、コロナ放電による絶縁材料の消耗には酸素の関与するところが大きく、上記のねばい生成物の生じた試料でも、水をつけた場合には容易にぬれ、また生成物も容易に水で洗い流すことができる。このことは表面に酸化層が生じたためと考えられ、酸化の起こらない窒素中でコロナ放電を受けた場合とは本質的に異なつている。

#### 5.5.4 各種条件下の表面抵抗の変動

ポリエチレン(ポリロン)、マイラ、ならびにテフロン(大阪金属KK製削板(リ)フロンシート)について空气中、ならびに窒素中

においてそれぞれ乾燥時ならびに高湿度時のコロナ放電による表面抵抗の変動の状況を表 1.5.9 に示した。ここで使用した電極装置は図 1.5.13 に示すものの上部の試料をマイカで置き替え、また抵抗測定用電極上には試料と同質の薄膜をつけないものである。表より、いずれの材質でも高湿度の場合には表面抵抗の低下が著しいことがわかる。また同一湿度においても窒素中の方が空气中より抵抗の低下率が少なく、空气中の実験において試料の表面抵抗が低下することに対しては、窒素の酸化物の影響、あるいはまた試料表面が酸化された状態となり、水との親和性が大きくなることの影響の大きいことが示されている。ここで、硝酸の蒸気を存在させるためには、電極の近くに濃硝酸の容器をおき蒸発させている。

表面抵抗は試料面の平均的性質に関係しているため、試料面の均一性と明確な関係を求めることはできないが、定性的には抵抗値の安定性が表面状態とある程度の関係をもつことがわかる。すなわち、表 1.5.9 において \* 印を付したものでは、抵抗測定時の電圧印加中に、不規則に抵抗の変動が起こる場合があり、これは試料表面に微小水滴が付着した状態となり、これらのつながり方が変化するためと考えられる。事実これらの試料を放電停止後手早く容器外に取り出してみると、微小水滴を認めることができる。すでに述べたように、このような表面の不均一は当然耐コロナ性に対しては悪影響を及ぼすものと考えられる。

表 1.5.9 各種条件下の表面抵抗の変動

(図1.5.13 電極使用, たゞし上面は 0.1 mm マイカ, 間隙長 1 mm, 70°C, 4kV, 1.5 kc)

No.	試料	雰囲気	湿度(%)	表面固有抵抗飽和値 ( $\Omega$ )		
				0.5 分値	1 分値	4 分値
1	ポリエチレン (0.1 mm 厚)	空気	0	$1.8 \times 10^{13}$	$2.4 \times 10^{13}$	$5 \times 10^{13}$
2	〃	〃	60	$2.8 \times 10^8$ *	$3.4 \times 10^8$	$4.4 \times 10^8$
3	〃	窒素ガス	0	$8 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{14}$	$4 \times 10^{14}$
4	〃	〃	60	$4.4 \times 10^8$ *	$5 \times 10^8$	$1 \times 10^9$
5	〃	〃	60 **	$5.5 \times 10^6$	$8 \times 10^6$	$2 \times 10^7$
6	マイラ (0.19 mm 厚)	空気	0	$10^{16} <$	$10^{16} <$	$10^{16} <$
7	〃	〃	60	$2 \times 10^8$	$6 \times 10^8$	$8 \times 10^8$
8	〃	窒素ガス	0	$10^{16} <$	$10^{16} <$	$10^{16} <$
9	〃	〃	60	$3 \times 10^{10}$	$3.6 \times 10^{10}$	$5 \times 10^{10}$
10	テフロン (0.3 mm 厚)	空気	0	$10^{16} <$	$10^{16} <$	$10^{16} <$
11	〃	〃	60	$3.2 \times 10^{10}$ *	$3.8 \times 10^{10}$	$6.2 \times 10^{10}$
12	〃	窒素ガス	0	$10^{16} <$	$10^{16} <$	$10^{16} <$
13	〃	〃	60	$4.4 \times 10^{13}$	$6 \times 10^{13}$	$10^{14}$
14	〃	〃	60 **	$1.2 \times 10^8$	$1.4 \times 10^9$	$3.6 \times 10^9$

注 (1) 表面固有抵抗の初期値はいずれも  $10^{16} \Omega$  以上である。

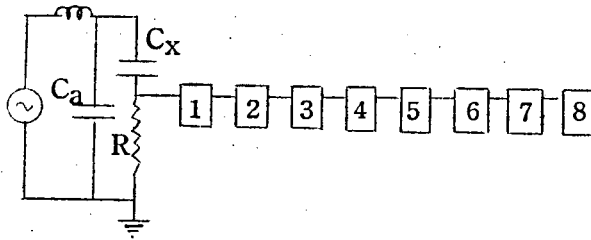
(2) \* 抵抗値が不安定なものである。

(3) \*\* 容器中に硝酸の蒸気が存在する場合である。

## 5.6 コロナパルスの測定結果

本研究では放電の量として放電電力をとつて検討を行なっているが、すでに述べたようにコロナ放電の様式は複雑に変化し、これらを解析するためには個々のコロナパルスを測定することも有効な手段であるものと考えられる。コロナパルスの測定については古くから多くの研究者によつて行なわれているが、その測定値の絶対値についての信頼性が乏しく、またその測定値をコロナ劣化と明確に結びつけることに対しては結論は得られていない現状である。このため電気学会放電専門委員会においては、コロナパルスの測定法の開発ならびに統一に関して共同研究を行ない、現在ほぼ標準測定法が確立され、また同一構造の電極ならびに絶縁材料の試料について各所でコロナパルス測定を行なつた場合ほぼ同一の測定値が得られるようになっている。<sup>(2)</sup> この場合の測定法は概略を図1.5.15のブロックダイアグラムに示したようなものであり、コロナパルスを電圧の値で区分し、おのこの発生頻度を求めるものである。このような方法によりコロナパルス個々の放電電荷量ならびに放電エネルギーの平均値を求めることができる。筆者もまたこの方法について検討を進めているが、まだ劣化に関係した定量的結論が得られていないので、ここでは定性的に検討した結果についてのみ述べる。

高湿度の場合のコロナパルスはその大きさならびに発生数が不規則に大きく変動することは一般に知られたことであり、<sup>(2)</sup> このことはすでに述べたような放電状況を直接観察した結果よりも明らかであるが、コロナパルスの分布状態と放電状態との対応を求めることは、放電が全体として大きく変動する場合あるいはまた特に大きな局部



$C_x$ : 試料

- |              |         |
|--------------|---------|
| ① インピーダンス変換器 | ⑤ 振幅選択器 |
| ② 高域濾波器      | ⑥ 波高分析器 |
| ③ 減衰器        | ⑦ 時間ゲート |
| ④ 増幅器        | ⑧ 計数器   |

図 1.5.15 コロナパルス解析器構成の一例

的放電が起こっている場合には別として、一般には非常に困難である。特にオ 5.4 節で述べたような針電極を使用した実験で、光点内の変化、すなわち放電点の微小範囲の移動をパルス観察から識別することはほとんど不可能である。したがって、コロナパルスを測定することは、ブリッジ法等によつて 全体の放電電力を測定するよりも、放電の状態を知るためには一歩進んだ測定方法ではあるが、パルスの分解能が  $1 \mu\text{S}$  程度の測定器により、パルスの大きさと発生頻度とを求めることのみから、ただちに放電状態を推定することは困難であり、コロナ劣化との関係を求めるにはなお今後多くの研究が必要である。コロナ測定法については現在各方面で研究が進められており、発展途上のものであるが、個々の放電の解析と同時に全体としての平均値を求めることは常に必要なことであり、この意味で放電電力を求めることの有用性は不変のものである。

高湿時のコロナ放電の不安定であることは上述の通りであるが、

定性的な傾向をみると、一般に高湿時にはコロナパルスが小さくなつて数が増加する傾向があり、一方またポリエチレン等でパルスが大きくなる場合もあることが経験されている。 コロナパルスが小さくなる一例を図1.5.16に示した。 コロナパルスの数が多くなることは、針電極等により試料上の狭い範囲に放電を起こさせている場合、表面抵抗が低くなると放電によつて試料上に推積した電荷が

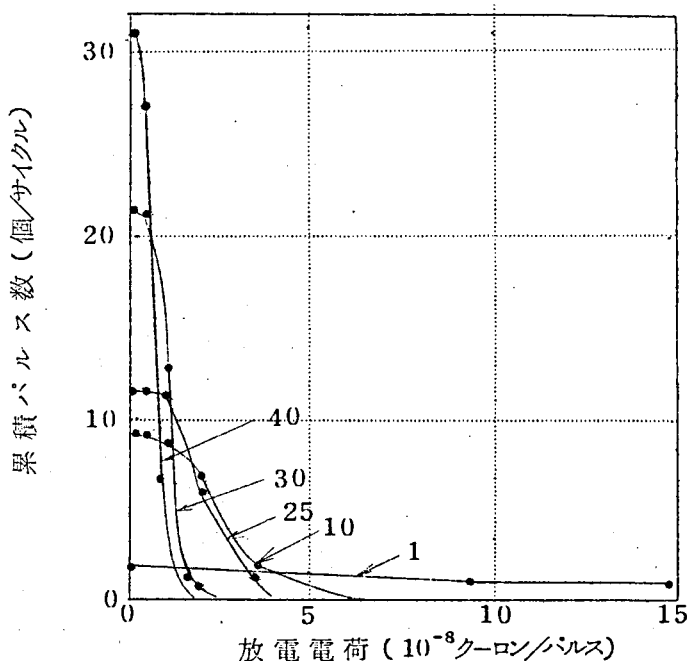


図 1.5.16 高湿時のコロナパルス累積度数分布特性推移の一例

注) (1) 実験条件 電 極 : 不銹鋼 (5 mm  $\phi$ , 先端 2.5 mm R)  
 間隙長 : 0.2 mm  
 試 料 : ポリエチレン (0.1 mm 厚)  
 雰囲気 : 空気 (相対湿度 60%)  
 温 度 : 70 °C  
 電 圧 : 3 kV, 1.5 kc

(2) 図中の数値は放電継続時間 (min) を示す。



表面導電によつて失われ、電圧回復速度がはやくなり放電回数が増加するものと考えられるが、<sup>(21)(58)</sup> 平等電界下で放電を起こさせている場合には図1.3.21に示すように、放電点の数を同じとすれば全体としての放電回数の増加はほとんど起こらないものであり、これに対しては別な機構を考える必要がある。すなわち、すでに才3.10節に考察したように、表面抵抗の低下によつて群放電の可能性が減少したことが主原因と考えられ、このことは才5.4節に述べたように一見一点の放電とみなしうるような狭い範囲の放電でも、さらにこれが細分されることから推定できることである。このほかまた表面状態の変化によつて放電の開始電圧の低下が起これば、これもまた放電回数増加の原因となるものである。一方高湿時コロナパルスの大いものが発生することに対しては、試料面に微小水滴等の付着が起こり、局部的に表面抵抗が著しく低下し、1回の放電の放電面積が大きくなつたことが原因と考えられる。

#### 5.7 各種雰囲気中のコロナ放電による破壊までの寿命

図1.2.2の電極装置を使用し、各種雰囲気中で求めたコロナによる破壊までの寿命を表1.5.10に示した。表より窒素中では消耗速度から予想されるより短い寿命となつており、特にポリエチレンでは空気中の約2倍の寿命に過ぎない。またポリエチレンについては同様な結果は他にも報告されている。<sup>(10)</sup> これはコロナ放電によつて試料の消耗が起こる場合に、消耗のA過程からB過程への移行が窒素中の方が起こりやすく、破壊時の試料の厚さ減少量より明らかなように窒素中では消耗量がそれほど多くならないうちに破壊が起こるためである。これはさきに表面抵抗の測定結果にも示したよ

表 1.5.10 各種条件下のコロナ放電による破壊までの寿命

(図1.2.2 電極使用, 間隙長 0.6 mm, 70℃, 5kV, 1.5kc)

No.	試料	雰囲気	湿度(%)	電界強度 (kV/mm)	放電電力 (W/cm²)	破壊までの寿命(μ)		厚さの 減少量 (μ)
						平均値	標準偏差	
1	マイラ (0.076mm厚)	空気	0	32.2	1.14	71	19.2	14
2	〃	〃	17	〃	1.19	161	33.6	20
3	〃	〃	17*	〃	—	211	20.9	22.3
4	〃	窒素ガス	0	〃	1.26	251	28.0	12
5	〃	〃	17	〃	—	261	36.4	16
6	〃	〃	17*	〃	—	570	36.9	30
7	ポリエチレン (0.1mm厚)	空気	0	35.2	0.92	95	9.3	20
8	〃	〃	17	〃	0.95	104	17.1	25
9	〃	〃	17*	〃	—	110	11.0	—
10	〃	窒素ガス	0	〃	1.02	192	55.0	8
11	〃	〃	17	〃	—	225	64.4	15
12	〃	〃	0*	〃	—	525	41.4	—
13	〃	〃	17*	〃	—	599	103.5	25
14	テフロン (0.3mm厚)	空気	0	14.6	0.32	69	30.3	—
15	〃	〃	17	〃	—	70	24.6	—
16	〃	〃	17*	〃	—	93	22.4	—
17	〃	窒素ガス	0	〃	—	172	48.8	—
18	〃	〃	17*	〃	—	410	24.2	—

注 (1) マイラについては上部電極に0.14mm厚ガラス板をはり付けたもの、  
他は0.1mm厚マイカをはり付けたものを使用した。

(2) \* 容器内に硝酸の蒸気が存在する場合である。

うに、乾燥窒素中では表面抵抗の低下が起こりにくいことが主原因と考えられる。顕著な特徴は窒素中で硝酸蒸気が存在する場合寿命が著しく長くなることである。これは雰囲気が窒素であるため均一消耗の速度が小さくなり、さらに硝酸蒸気が存在して表面抵抗が均一に低下し、B過程すなわち局部的消耗への移行が起こりにくくなり、結果的に寿命が非常に長くなつたものである。硝酸を使用する方式はただちに実用することはできないが、これと同等の働きをするものがあれば実用上有効な耐コロナ性向上のための処理剤として使用できるものと考えられる。コロナ放電の条件によつては水分を存在させることも有効な方法となり、特に面積の小さいボイドでは放電の減少が起こるものであるが、広がりの大きいボイドでは材質ならびに湿度等の条件により必ずしも効果の期待できない場合もあり、実際の絶縁にこのような表面抵抗を下げる処理剤を使用する場合には条件に応じ適当なものを選ぶことが必要である。

本実験に使用したテフロンは従来削り出しのものであり(ポリ四弗化エチレン)、表面に製作時の傷があり、かつ組成の均一性も他の材質より劣るものであるため、乾燥状態では単に寿命が短くなるのみならず、ばらつきも非常に大きい結果であるが、窒素中でも硝酸蒸気入りの状態では明らかに寿命が長くなつている。テフロンの耐コロナ性がよくないことについては、すでに述べたように種々の説が提出されており、それらはいずれもある範囲内で正しいことであるが、本研究で明らかになつたように、放電の起こり方という二次的条件もかなり大きいものと考えられる。すなわち、さきに述べたように、テフロンは放電をうけても表面抵抗の低下は

起こりにくく、また空気中のコロナ放電によりかなり消耗をうけた面でも全然水にぬれる性質を示さず、他の有機材料とは著しく異なつた性質をもっている。これらの実験により、絶縁材料の耐コロナ性はコロナ放電によつて起こる消耗の速度と、均一消耗から不均一消耗に移行する条件とが重要であることが確認されたものと考えられる。

## 5.8 放電生成物の影響

さきに放電時試料から発生する水分が、容器中の乾燥剤の存在にもかかわらず試料面に付着し、寿命に影響を与えることを述べたが、ここでは放電をうけない他の部分に放電生成物が付着することの影響についての検討結果を述べる。図 1.2.2 の電極装置によつて実験する場合には、3個の電極下の試料が全部破壊し終ると上部電極を移動し試料の新しい面上で同様な実験を行なうが、この場合 1 回目の実験と 2 回目以後の実験とでは寿命に有意差がみられる。試料が薄く寿命も 30 分以内 ( $1.5\text{kc}$  において) ではその差は顕著でないが、厚い試料ではこの差が大きい。一例を表 1.5.11 に示した。この場合もちろん各実験の前には乾燥剤の入つた容器中で十分に準備期間をおき、温度ならびに湿度等による誤差のないようにしている。これに対し各回の実験が終ると、アセトン等の溶剤により次に実験する面を十分ぬぐつて同様な実験を行なえば、1 回目の結果と有意差のない値が得られる。以上よりコロナ放電が起こつた周辺の試料面には、単に水分のみならず他の放電生成物が同時に吸着され、このように寿命に影響を与えたものと考えられる。またそれら生成物の吸着量は非常にわずかのものであつても、表面抵抗測

定で経験されたように破壊までの寿命を求める実験においては、放電によりその影響が拡大されて現われるものと考えられる。これらの結果は実用的意味も大きいし、またコロナ劣化の実験を行なう上にも注意すべきことである。

表 1.5.11 マイラのコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす放電生成物の付着の影響

(図1.2.2電極使用, 試料厚  $0.19mm$ , 乾燥空气中(シリカゲル入), 間隙長  $0.6mm$ ,  $5kV$ ,  $1.5kc$ )

寿 命 (min)	
1 回 目	2 回 目
134	270
251	360
134	217
126	470
189	115
166	183
119	246
341	276
117	140
平均 175	252

## 5.9 試料厚さの影響

試料厚さが種々異なつた場合の実験結果を表 1.5.12 に示した。同一印加電圧の実験で試料を厚くすれば電界強度は減少し、さらにまた放電電力は大きく減少する。したがつて、試料を厚くすると寿命は一見著しく長くなつてゐるが、破壊までの放電エネルギーではそれほど増加していない。すなわち破壊が起こつたときの試料の

表 1.5.12 コロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす試料厚の影響

(図1.2.2 電極使用, 乾燥空气中(シリカゲル入), 70°C, 5 kV, 1.5kc)

試料の 材 質	厚 さ (mm)	間隙長 (mm)	寿 命		放電エネルギー (Wh/cm <sup>2</sup> )	厚さの減少量 (μ)
			時 間 (min)			
			平均値	標準偏差		
マイラ	0.076	0.6	30.4	8.0	0.7	6.3
〃	0.19	〃	175	71.5	2.16	16.0
〃	0.19×2	〃	1535	186	11.0	90.0
ポリエチレン	0.1	〃	105	23.6	0.92	16.5
〃	0.3	1.0	1037	240	6.9	59.0

平均厚さは試料の厚いものほど大きく, したがって平均電界強度は試料厚の大きいものほど小さくなる。これはコロナによる消耗量が多くなると面は次第に凹凸が大きくなり, 平均電界強度がそれほど大きくならないうちに凹みの内ではエネルギー集中が起こり, 局部的侵食孔としてのび始めるためと考えられる。なお破壊点付近の面の状態の一例を図 1.5.17 に示したが, 試料の厚いものほど凹凸がはげしいことがわかる。すなわち, これは前述のように破壊時の平均厚さは厚い試料の方が大きいため, 孔の中で同一のエネルギー密度となるとすれば, 厚い試料の場合には孔が深いことが必要となるためである。なお, 試料の変質に関してはさきに均一消耗の過程では変質しないことを述べたが, 本実験においてマイラを2枚重ねて実験したとき, たまたま1枚目から侵食孔が進展し, ちょうど2枚目の表面に達したときの試料が得られたので, 下側の試料について破壊試験を行なったが, 放電をうけない試料についての値と全

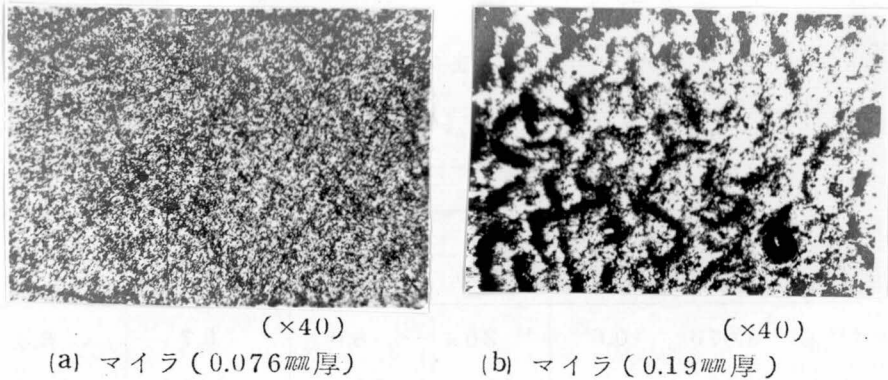


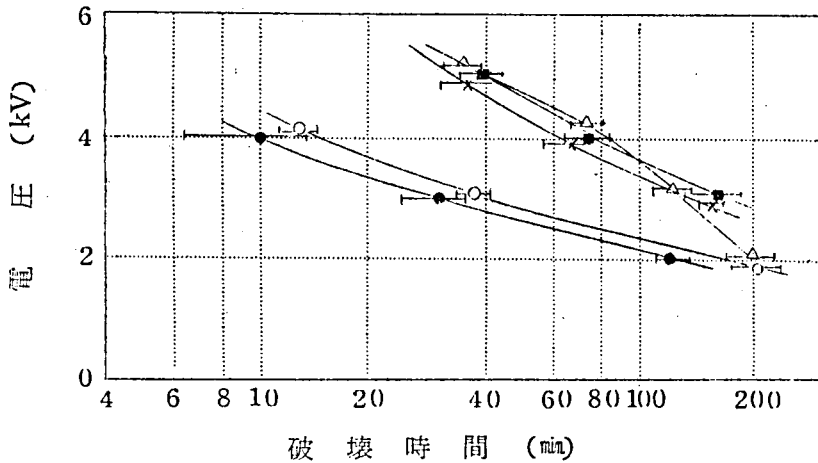
図 1.5.17 コロナ放電による破壊孔付近の試料表面状態

- 注) (1) 実験条件 電 極: 図 1.2.2  
間隙長: 0.6 mm  
雰囲気: 乾燥空気 (シリカゲル入)  
温 度: 70 °C  
電 圧: 5kV, 1.5kc
- (2) 透過光線により撮影したものであり濃淡が凹凸に対応する

然変らない結果であつた。したがつて、侵食孔がその先端で材質の変化を伴なつて進展してゆくとしても、その変質は先端近傍のごくわずかの部分に限られることが考えられる。またこの実験ではマイカによつて全路破壊が起こるのを阻止しているため、コロナ侵食が起こる間、電極からの電子の直接的な供給は起こらない。したがつて、コロナ放電による劣化は放電によつて生ずるイオン、電子、活性分子ならびに解離した原子等が主体となつて侵食が起こり、試料面上で局部的には材質の本質的破壊強度に達して急速に侵食孔がのびて破壊に至るものと考えられる。

#### 5.10 印加電圧の影響

乾燥空気中において印加電圧と寿命との関係の一例を図1.5.18に示した。



試 料	電 極	間隙長(mm)	温度(℃)
● : ポリロン (0.1 mm厚) 図1.2.1(a)	〃	0.5	80
● : マイラ (0.076mm厚)	〃	〃	〃
○ : テフロン (0.14 mm厚)	〃	0.2	70
△ : スミカセン (0.1 mm厚)	〃	〃	〃
× : マイラ (0.076mm厚) 図1.2.2	〃	〃	〃

図 1.5.18 印加電圧と破壊時間との関係

注) (1) 実験条件 雰囲気: 乾燥空気(シリカゲル入)

電 源: 1.5 kc

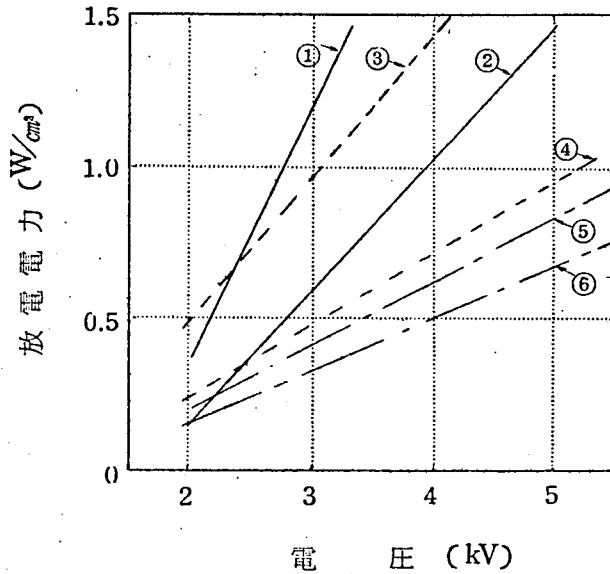
(2) 横線は標準偏差を示す

図1.5.18はいわゆるV-t特性といわれるもので、絶縁性能を表わす実用的表示法としては一般的なものであるが、この特性のみによつてただちにコロナ劣化機構を推定することはできない。すなわち、V-t特性の傾斜により耐コロナ性の良否を判定するという試み<sup>(59)</sup>もあるが、それには放電エネルギーを考慮する必要がある。

コロナ放電の電力と印加電圧との関係は(1.3.5)式によつて示されるが、印加電圧をコロナ開始電圧(印加電圧としての値)のn倍として式を変形すると(1.5.1)式が得られる。

$$W = 4 f V_S^2 (C_2 + C_1)(n-1) \quad (1.5.1)$$





試料	間隙長 (mm)
① マイラ (0.076 mm厚)	0.5
② ポリエチレン (0.1 mm厚)	〃
③ マイラ (0.076 mm厚)	0.2
④ ポリエチレン (0.1 mm厚)	〃
⑤ マイラ (0.19 mm厚)	〃
⑥ ポリエチレン (0.14 mm厚)	〃

図 1.5.19 放電電力と印加電圧との関係

注) 実験条件 電極：図 1.2.1 (a)

温度：70°C

電源：1.5 kC

本実験における電圧と放電電力との関係は図1.5.19に示したが、電力は印加電圧により直線的に上昇し、この特性の傾斜は(1.5.1)式に示すように、間隙の放電電圧  $V_s$  の大きいほど、すなわち放電間隙の大きいほど急となり、また間隙長が一定の場合には、間隙と直列な絶縁材料の静電容量(図1.3.4における  $C_2$ )の大きいほど傾斜が急となる。ただし、コロナ開始電圧のごく近くでは放電が不

安定となり、必ずしも直線関係の得られないこともある。一般に材質が異なれば誘電率も異なり、電界強度を等しくし、かつ容量( $C_2$ )も等しいという条件は満足されにくいので、 $V-t$ 特性によつて材質の比較を行なう場合には(1.5.1)式を考慮することが必要である。同様に放電量を表わすのに印加電圧をコロナ開始電圧の何倍という表現も一般に使われてはいるが、<sup>(60)</sup>これも(1.5.1)式に示すように絶対量を表わすことはできず、試料の構成に關係する量であることを考慮する必要がある。

図1.5.18の特性を放電エネルギーで表わせば図1.5.20のようになる。一般に放電エネルギーで寿命を表わせば電圧の影響は減少し、また特性の傾斜も耐コロナ性を考える上で有意なものとなる。図において、ポリエチレンの0.2 mm 間隙における実験結果を別とすれば、他は常識的に予想されるような特性を示している。すなわち、

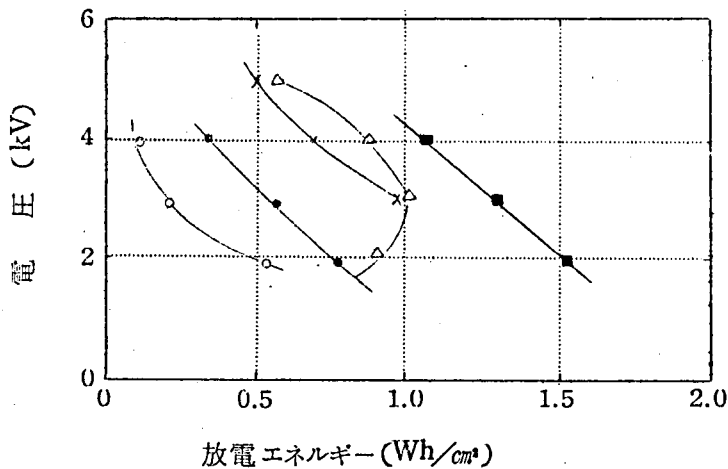


図 1.5.20 印加電圧と破壊までの放電エネルギーとの関係

注) 記号ならびに実験条件は図1.5.18と同じ

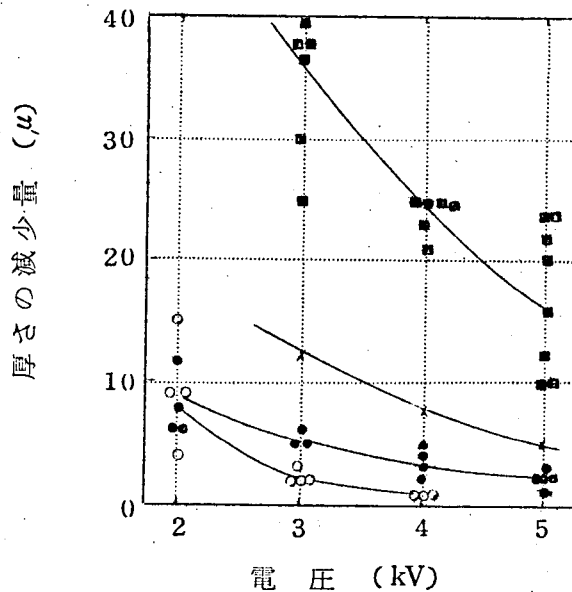


図 1.5.21 コロナ放電により破壊までに起こる厚さの減少量

注) 記号は図1.5.18と同じ

それらの場合の絶縁破壊が起こるまでの厚さの減少量は図1.5.21に示すように、低電圧で実験した場合ほど大きくなっており、低電圧では残存厚さが小さくなってから局部的侵食孔が生じたことが推定される。しかし、ここで例外は前記のポリエチレンについて0.2 mm間隙で実験した場合である。すなわち、この場合には印加電圧が低くなるとかえって破壊までの放電エネルギーが減少する傾向があり、これは前に図1.5.6に示したように破壊までの試料の厚さの減少が、印加電圧により有意差がないことに対応している。このような現象が起こった原因については次のように考えられる。すなわち、すでにしばしば述べてきたように、コロナ放電によつて試料表面の抵抗が一様に低下すれば、局部的侵食孔の発生が遅れ寿命が長くなるが、この表面抵抗の低下に対しては試料より酸化によつて

生成される水分の影響が大きいものである。水分の生成される速度は材質によつて異なることはもちろんであるが、放電電力が大きいほど大きくなる。しかし、一方放電電力が大きいほど発熱量も大きく、したがつて放電空間の温度が高くなり相対湿度が減少することになる。この両者の作用のかね合いで表面状態が決まり、したがつて放電様式が決まるものであるが、ポリエチレンについて 0.2 mm で実験した場合には、電圧を上げるほど前者の影響、すなわち水分の発生速度が大きくなる影響が強調され、表面抵抗の低下が著しかったものと考えられる。このことはさきに湿度の影響を検討した際に、図 1.5.5 に示すように印加電圧が低いほど湿度によつて寿命が長くなる割合が大きいことの原因と考えられる。すなわち、高電圧では、湿度 0 % のときすでに発生水分によつて寿命が長くなっているため、水分によつて表面抵抗が安定に低下しうる最大値までの差が少なくなつたものと考えられる。これに対し放電間隙を 0.5 mm とした場合には空気の流通は容易になり、しかも放電電力は大きくなつて放電空間は高温となるが、その割合には水分の発生は増加せず、図 1.5.20 ならびに図 1.5.21 に示すように特に大きな発生水分の影響をうけなかつたものと考えられる。同様にマイラの場合には水分の発生速度が小さいので、このような現象は起こらないが、場合によつてはポリエチレンと逆な現象が起こることがある。すなわち、すでに図 1.5.2 に示したように、湿度 0 % の場合の 1.5 kc で実験したときの寿命が、150 % で実験したときの値の 1/2 より小さくなっているのは、前者で発熱が大きく、空間の相対湿度が低下する影響の方が水分発生速度が大きいことの影響よりも優位とな

つて表面抵抗が増大したことが原因と考えられる。このようにコロナ放電による破壊までの寿命は、材質と試料構成、電圧、周波数ならびに温度等との関連によつてその特性が変化するが、それらの機構としては、試料表面状態の変化に基づく放電様式の変化によるものと考えることができる。したがつて、異なつた材料の耐コロナ性を実験条件とは無関係なものとして比較することは困難であり、周波数を大きくした加速実験では特に上述の特性を考慮することが必要である。このため、材質の耐コロナ性の比較試験を行なうために乾燥空気を流した中で行なうことを推奨しているものもあるが、<sup>60</sup>その方法によつても加速実験においては、上記のような試料から生成される水分等の影響を完全に除去することは困難であるものと考えられる。結局材料としての耐コロナ性を評価する場合には、上述の諸要因を考慮することが必要であり、さらに実用的な性能を知るためには実際の絶縁として使用される状態との関連を考え、適当な構造のモデル、あるいは実物等によつて再検討することが必要である。

上述のようなポリエチレンについての現象はだいたい加速実験のための特殊現象とも考えられるので、そのような特性の認められないマイラについて印加電圧の影響について検討を行なつた。すなわち、コロナ放電により表面から次第に消耗が起こり、平滑な面が次第に粗になるが、この面の状態に及ぼす印加電圧の影響について検討を行なつた。実験は低い電圧を印加して放電させ、一定時間後に電圧を上げて破壊までの寿命を測定し、これと最初から高い電圧を印加した場合との寿命の比較を行なうものである。ここで低い

電圧を印加した時間については、各電圧の放電電力を測定し、全放電エネルギーが等しくなるように高い電圧での値に換算するものとする。この方法でもし同一寿命が得られたとすれば、一定量消耗後の面は電圧に関係なく一定と結論される。3ミル(0.076mm)厚のマイラでは表1.5.13に示すように実験時の電極構成に関係なく、

表 1.5.13 マイラの表面状態に及ぼす印加電圧の影響

(試料厚0.076mm 乾燥空气中(シカゲル)1.5kc電圧)

電 極	電 圧 (kV)	温 度 (°C)	間隙長 (mm)	寿 命 (min)		厚さの減少量 (μ)
				平均値	標準偏差	
図1.2.2	3→5**	70	0.6	35.8*	7.25	7.9
	5	70	0.6	31.3	10.7	5.9
図1.2.1(a)	2→3.5***	80	0.5	28.6*	3.2	—
	3.5	80	0.5	17.0	—	—

注) (1) \* 5kVに換算した値である。

(2) \*\* , 3kVの印加時間は80分

(3) \*\*\*, 2kV       〃       60分

低電圧で最初実験したものの方が寿命が長い、全実験を通じばらつきがかなり大きいため、両者に大きな差異はないものと考えられる。これは試料厚さが薄いため、A過程中に起こる消耗量自体が非常に小さく、明確な差異が得られなかつたものと考えられる。しかし、これに対し7.5ミル(0.19mm)厚のマイラでは表1.5.14に示すように明らかに差異があり、3kVから5kVに昇圧したものの方が寿命はるかに長くなり、また破壊が起こるまでの厚さの減少量もはるかに大きくなっている。本実験では寿命実験中の全時間についてのコ

表 1.5.14 マイラの表面状態に及ぼす印加電圧の影響

(図1.2.2 電極使用, 試料厚 0.076 mm, 乾燥空气中(シカゲル)  
間隙長 0.6 mm, 1.5 kc 電圧)

電 圧 (kV)	寿 命 (min)			厚さの減少量 (μ)
	平 均 値	標準偏差	5KV昇圧後の値	
3 → 5 **	222*	56.5	133	28
5	123	45.6	—	14

注 (1) \* 5 kVに換算した値である。

(2) \*\* 3kVの印加時間は240分。

ロナパルス測定は行なっていないが、最初の状態では印加電圧によつてコロナパルス電圧に変動は認められず、この点は一般に認められている特性と一致している。この実験結果から、同一量消耗が起こつても試料面の状態は印加電圧によつて変化することが推定され、コロナによる絶縁劣化を問題にする場合には、コロナパルスの大きさ、ならびにその分布、放電全電荷量あるいはまたさきに述べた放電エネルギーの集中度合等のほかに、印加電界強度をも考慮する必要があるものと考えられる。

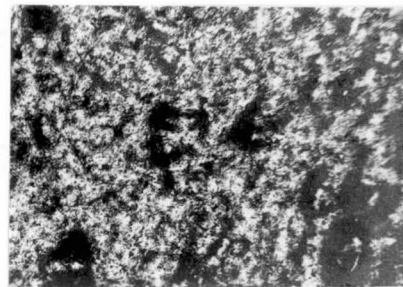
また、表1.5.14の結果では3kVより5kVに昇圧したもので、5kVに昇圧してから破壊が起こるまでの時間だけでも、最初から5kVを印加したときの寿命とほぼ等しいか、むしろ若干長くなっている。すなわち3kVで放電し、ある程度消耗が起こつた状態の試料は、全然コロナをうけない初期状態の試料に比して、5kVで実験する限りでは長時間の寿命をもつように改善されていると考えることができる。この現象は単に表面の凹凸等の形状のみの問題として説明す

ることは困難であり、すでに述べたように放電生成物が試料表面に付着し、3kVの放電実験の終った状態では表面抵抗の低下による局部侵食の起こりにくい傾向が、表面の凹凸による局部侵食の起こりやすい傾向を打ち消しているものと考えられる。これは一種の材料の変質とも考えることができるが、その変質の範囲はさきに述べたように表面のごく薄い層に限られている。

表面状態の変化の一例として、マイラについて電界強度の差異による表面凹凸の差異を図1.5.22に示した。試料は0.19mm厚であり、いずれも約0.1mmの厚さの減少があつた状態であり、高電界の場合の方が表面の粗れが大きいことが示されている。



(×40)



(×40)

電 極 : 図1.2.2

I.E.C.法 (ガラスセル)

試 料 : マイラ (0.19mm厚, 2枚重ね)

マイラ (0.19mm厚, 1枚)

電 圧 : 5kV, 1.5kc

7kV, 1.5kc

電界強度 : 11.3 kV/mm

6.5 kV/mm

厚さ減少量 : 約 0.1mm

約 0.1mm

図 1.5.22 同量消耗時における試料表面状態の電界強度による差異

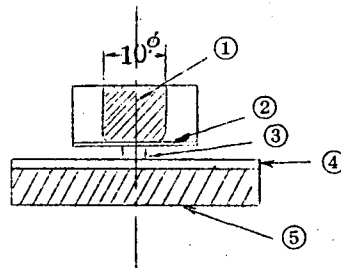
注) 透過光線による撮影のため濃淡が試料面の凹凸に対応する。



### 5.1.1 ボイド形状の影響

以上の実験はすべて平等電界下の耐コロナ性について検討を進めてきたが、実際の絶縁構造中にはいずれかの形で放電部の端が存在するものであり、ここではこの端部の形状がコロナ放電による破壊までの寿命に及ぼす影響について検討を行なった。

実験はまず最初絶縁構造中のボイドを模擬して図1.5.23の方法で行なった。モデルボイドの実験は通常円筒形のボイドを作つて実験しているものが多いが、<sup>(6)(60)</sup> 本実験でこの形状を選んだのは、平等電界の場合の結果との比較を容易にするためと、放電状況を外部から観察するためとである。実際の絶縁構造中にはこのように角を有するボイドのあることは少ないが、たとえば合成樹脂のテープを巻きつけたままの絶縁等ではこのような形のボイドが存在することとなる。



- ① 高圧電極
- ② マイカ (0.1mm厚)
- ③ スペース (2×2mm)
- ④ 試料
- ⑤ 低圧電極

図 1.5.23 モデルボイド実験用電極装置

マイラについて放電間隙長を変えた場合の実験結果を表 1.5.15 に示した。破壊は例外なしにスペーサと試料との接する角で起こり、他の実験者の結果と一致する。また寿命は平等電界の場合よりかなり短くなり、減少の割合は間隙長には無関係のようである。ただし、試料厚さが変つた場合の特性については電界強度を考慮することが必要であり、表の結果は 1 例を示すのみである。

表 1.5.15 ボイド縁端における破壊までの寿命

(図1.5.23 電極使用, マイラ, 乾燥空气中(シカゲル入), 70°C, 5kV 1.5kc)

試料厚 (mm)	間隙長 (mm)	寿 命 (min)		
		平均値	標準偏差	端のない場合との比較*
0.076	0.2	19.9	5.09	0.556
〃	0.6	14.7	3.32	0.485
〃	1.0	21.6	6.71	0.526
0.19	0.6	74.3	11.7	0.425

注) \* 端のない場合の寿命を 1 とする。

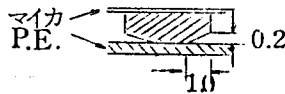
ポリエチレンについて種々の材質のスペーサを使用した場合の実験結果を表1.5.16 に示した。この場合にも例外なく破壊はボイド端の角で起こっている。J.H.Mason<sup>(6)</sup>の実験では破壊が角の部分で起こるのみならず、長時間コロナ放電を続けると放電も周辺部のみで起こるようになることが示されているが、本実験ではボイドの寸法も異なり、放電は一様に起こっていることが観察されている。

表 15.16 スペーサの種類とコロナ放電による破壊までの寿命との関係

(図1.5.23 電極使用, ポリエチレン(0.1mm厚), 乾燥空气中(シリカ粉入)  
間隙長 1 mm, 70℃, 5kV, 1.5kc)

No.	ス ペ ー サ の 種 類	寿 命 (min)					
1	ガラス(パイレックス)	43	43	43	42	43	43
2	ポリエチレン	5	05	1	3	2	2
3	マイラ	44	8	44	-	-	-
4	ポリエチレン, 側面カーボン	45	2	19	-	-	-
5	ポリエチレン, 側面シリコーン	3	1	05	-	-	-
6	ガラス, 側面シリコーン	52	48	30	-	-	-
7	金 属	45	52	50	56	52	52
8	ポ リ エ チ レ ン	88	69	67	-	-	-
9	ス ペ ー サ 電 界 外	80	110	90	107	74	87

注) No. 8 の スペーサ形状は下図のようである。



放電の起こらないときの電界を考えればボイドの角の部分では他の部分に比して小さくなるものであるが、それにもかかわらず前述のように破壊はこの部分で起こっている。このような現象の生ずる原因については、放電により複雑な電界歪が起こることならびに側壁の存在により放電電圧の低下が起こること<sup>(61)</sup>等が報告されており、また後者の機構については破壊時の電子の供給に本質的な差異があることを推定している報告もある。<sup>(60)</sup> しかし、筆者はその原因を次のように考える。すなわち、ごく簡単に考えれば、ボイド放

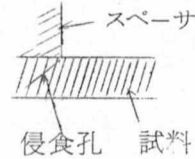
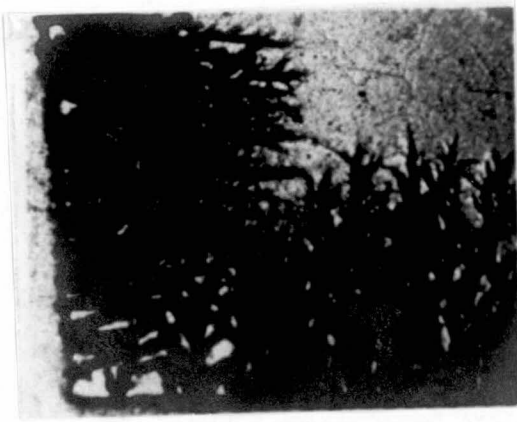
電が起こるとボイド全体は一種の導体と等価となり、ボイドの角の部分の電界強度が最大となるものである。また、放電を個々の放電点における小放電の集合と考えると、平等電界部の放電点では多少とも沿面放電ならびに表面導電が起こり、これらは放電点の電界集中を緩和し、侵食がB過程に移行するのを防止する働きがあるが、角の部分ではそのようなことが起こらず、B過程に近い状態からコロナ劣化が発するものと考えられる。表 1.5.16 に示すように、スペーサの材質により寿命が著しく異なる場合があるが、これはスペーサの誘電率の差異により角の部分の電界集中の度合が変化したものと考えられる。すなわち、ボイドを導体と置き替えて考えれば、スペーサの誘電率が大きいほどボイドの角の部分の電界強度は緩和されることになる。このことはまたスペーサの側面にごく薄くワニス処理をしても寿命に変動はないことより、表面の性質の差に基づくものでないことが明らかである。ポリエチレンのスペーサの側面にカーボンを塗布し導電性とした場合には、明らかに角の部分の放電が起こりにくくなり、寿命は長くなるが、付着状態が完全でないものでは短い寿命のものが得られる。これらのことから実際の絶縁構造中では表面抵抗が一様に低下すればボイド放電量自体も減少し、寿命が長くなることは当然考えられることである。金属をスペーサとした場合には、絶縁材料をスペーサとした場合とは逆に、放電が起こらないときスペーサ端部の電界が最大となるが、放電が起これば電界は緩和されるものと考えられ、事実コロナ放電の起つた場合の寿命は他のスペーサの場合より長くなっている。この場合には破壊点の位置も沿面コロナの実験の場合と同じく、ス

ペーサの角からわずか外へはなれたボイド内である。

実用的な意味からも興味ある特性としては、表1.5.16のNo 8に示すように、スペーサの試料に接する部分にわずか隙間があいていると、スペーサの下の部分まで放電が起こり、スペーサ側面の直下では電界緩和が起こっているために寿命は著しく長くなることである。この場合、試料のスペーサに実際に接する部分では、スペーサも絶縁厚に加えられるため、電界方向に対するその部分のボイドと直列の絶縁厚が大きくなったこととなり、この点における放電はわずかなつて大きな弱点とならないものと考えられる。

試料のスペーサに接する部分はかなりとがつた角となつていながらもかゝわず、一見ただちにB過程とならず、この意味では比較的寿命が長い、このことの一つの理由としては、放電時のこの部分の電界が印加電界方向と一致せず、最初の侵食孔は樹枝状となつて斜にスペーサの下側に向つてのびるため、B過程の時間が比較的長くなつたためと考えられる。この場合の侵食孔の進展状況の一例を図1.5.24に示した。

次に片側が金属電極の場合、すなわち図1.2.1 (a)の構造で中央にスペーサを入れた電極構成によりボイド縁端の影響を求め、結果を図1.5.25に示した。この場合も例外なく破壊は角の部分から起こり、平等電界のコロナ放電をうけた場合より寿命は短くなつてい。特に顕著な特徴としては、スペーサが存在する場合、マイラとポリエチレンとでは平等電界下で放電をうけたときよりの寿命の減少度が異なることである。これは材質の本質的な差異のみならず、誘電率、電界方向ならびに電界強度等も大きく影響しているものと



(×25)

図 1.5.24 スペーサ下の樹枝状放電路の進展状況

注) (1) 実験条件 試料: マイラ (0.19mm 厚)  
 温度: 70℃  
 雰囲気: 乾燥空気 (シリカゲル入)  
 間隙長: 0.6 mm  
 電圧: 5 kV, 1.5 kC

(2) 侵食孔の進展方向は右図に示すようである。

考えられる。しかし、いずれの場合も電界強度が小さくなるとともにボイドの角の影響が少なくなり、このことは実用的には重要な特性である。

実際の絶縁構造中で生ずるボイドは、通常球形もしくは楕円体である。また発電機コイル等のマイカを併用する絶縁では図1.5.26に示すような断面をもつボイドの存在することが考えられる。前述の実験により、これらの場合にはボイド中に特定の弱点は生じないことが考えられるが、これを図1.5.27に示す方法により確認した。すなわち、図中(a), (c)では破壊の起こる位置は特定の点に集中せず、寿命もスペーサのない場合と有意差はなくなるが、(b)では角で破壊

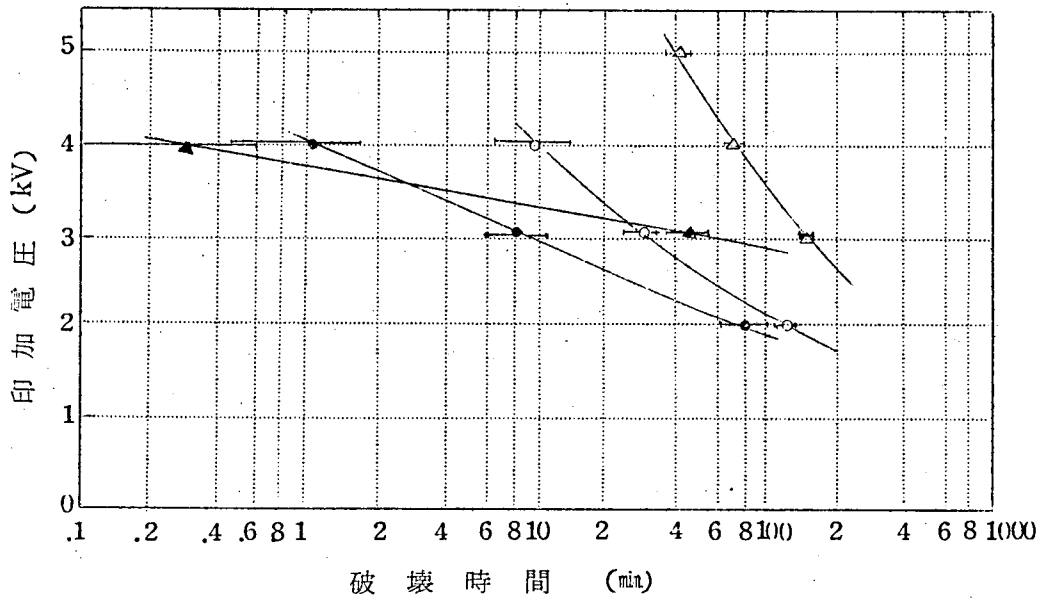


図 1.5.25 ボイド縁端の寿命に及ぼす影響

注) 実験条件, 電 極: 図 1.2.1 (a)  
 間隙長: 0.5 mm  
 雰囲気: 乾燥空気 (シリカゲル入)  
 温 度: 80 °C  
 電 源: 1.5 kc

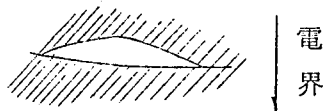


図 1.5.26 マイカ組合わせ絶縁中に生ずるボイド形状の一例

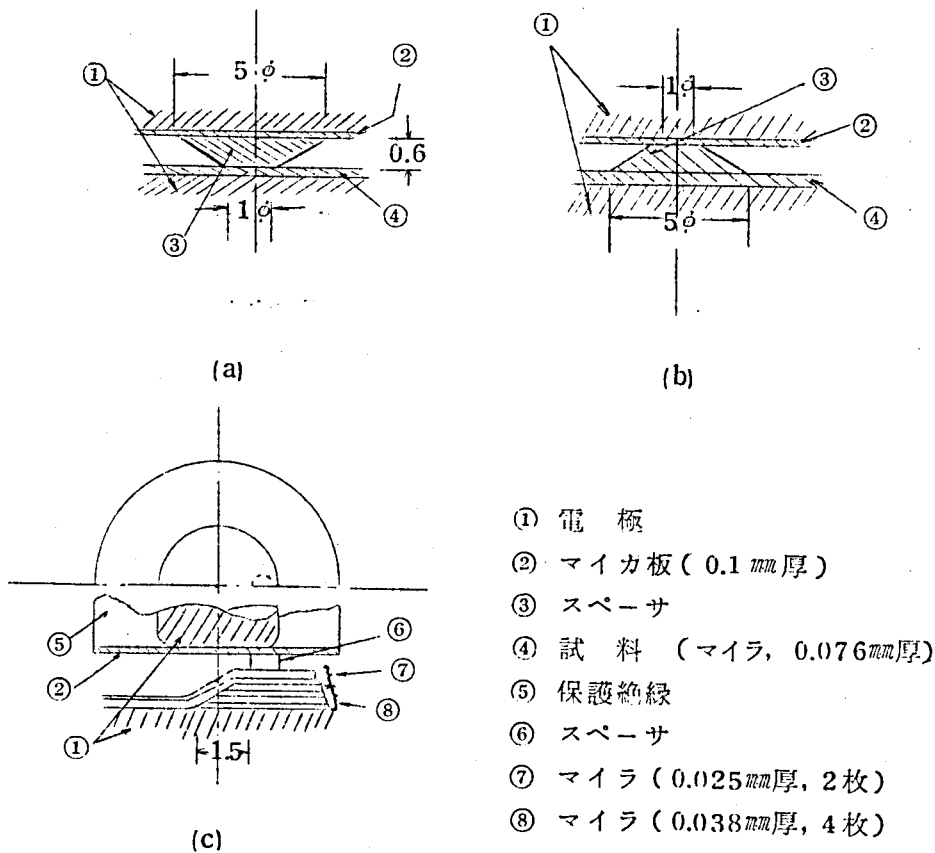


図 1.5.27 ボイド端の電界強度集中状況検討用各種電極装置

が起こり、スペーサの傾斜をゆるやかにすれば寿命は長くなるが、不連続点があれば弱点となることが示された。

以上より実際のボイド放電を対象としてコロナ劣化を検討するには、図 1.2.1 ならびに図 1.2.2 等の電極配置は適当なものの一つであることがわかる。また実用絶縁としては、シート材料をテープ巻したのみの構造ではボイドに角を生じ、耐コロナ性の点では好ましい特性は得られず、たとえ大部分が流出してしまおうとしても液体絶



縁材料を含浸しておくことは有効なことと考えられる。なお、絶縁油等の場合にはボイド放電によつて、才2部に述べるようないわゆる自己回復作用も起こり、<sup>(62)(63)</sup> いつそう好都合である。なおまた、本実験では研究対象としていなかつたが、実用的にはボイド放電の量（放電電力等）の増減が重要な問題であり、その面からもボイド形状の影響を検討することも必要である。

スペーサの角の影響と類似の現象は、耐コロナ性の異なつた材料を組合せた場合にも起こる。たとえば、シリコンは単独では非常に耐コロナ性のすぐれたものであることはすでに述べたが、実用絶縁として他の合成樹脂面にシリコンを塗布する場合に、もし局部的にシリコンのつかない部分があるとかえつて寿命が短くなるのが普通である。これはシリコン被膜の存在する部分では、コロナ放電をうけても消耗はほとんど起こらず、シリコン被膜のない部分では消耗が起こるために、境界部では階段状となつて角が生じ、この角の部分では電界集中が起こり、コロナ侵食孔がのびやすいものである。このような侵食が起こる一例を図1.5.28に示した。これはガラスセルを使用した非破壊実験において、試料の面の半分にシリコンワニス（シリコン樹脂）を約0.01mm程度焼付けしたものである。この場合スペーサは遠く電界外にあり、このように消耗速度の差による角でも破壊が起こりやすいことは、さきに考察した機構の妥当性を示すものと考えられる。

## 5.12 総 括

以上の実験により、コロナ放電による侵食が、表面からの均一消耗過程から局部的侵食孔として進展する過程へ移行する機構がかな



(×40)

図 1.5.28 シリコン焼付境界部のコロナ侵食孔の進展状況

注) (1) 試料下面にも段があるが、これは試料切断時変形したものであり実験中は平滑である。

(2) 実験条件, 電 極: I.E.C.法  
間隙長: 1 mm  
試 料: マイラ (0.19 mm厚)  
雰囲気: 乾燥空気(シリカゲル入)  
温 度: 80 °C

り明らかになつたものと考えられる。すなわち、均一消耗から不均一消耗に移行する時期を左右するものとしては、放電時の試料の表面抵抗の影響が大きく、たとえば乾燥した雰囲気中では水分の発生速度が大きく、表面抵抗が均一に低下しやすいものにおいては、不均一かつ局部的な侵食が起こりにくく、コロナ放電による破壊までの寿命が長くなる傾向がある。また高湿度中では一般にコロナ放電によつて表面抵抗は低下するが、表面状態が均一な場合には寿命は長くなり、逆に微小水滴の付着するような不均一状態となればエネルギー密度の大きい放電が起こり寿命が短くなる傾向がある。これらの現象は絶縁材料の材質によつて変化することは当然であり、

たとえばテフロン<sup>®</sup>の耐コロナ性がよくないことに対しては、コロナ放電による表面抵抗の均一な低下が起こりにくいことも有力な原因と考えられる。したがって、一般に実用的な意味の耐コロナ性を向上させるには、放電雰囲気中に酸素をなくしてコロナ放電による消耗の速度を小さくし、かつ放電時試料面の抵抗が均一に低下するような処理等を行なつて、不均一かつ局部的な侵食を起こりにくくすることが有効であることを確認することができた。このほかまた、ボイドの形に角があれば放電時に電界集中が起こり、この点からコロナ侵食により破壊が起こりやすいことも明らかとなつた。

本研究において検討した事項は、絶縁材料の固有の性質にはもちろん関係があるが、それはコロナ放電の様式をどのように変化させまたどのように侵食形式を変化させるかといういわゆる二次的条件との関連においてである。これよりほかに材質の分子構造に關係する本質的性質として、電子ならびにイオンの衝撃に対する強さ等もちろん重要な問題である。しかし、一般にコロナ放電では放射線照射等の場合と異なり、放電の状態を厳密な意味で一定とすることは非常に困難であり、また電子ならびにイオン等の個々の衝撃エネルギーも小さいので、直接的な化合結合の切断等は起こりにくく、ここで取り上げたような二次的条件の影響がもつとも大きいものと考えられる。したがつてまた、絶縁材料の材質のみ指定し、その使用される条件等と無関係にその耐コロナ性を規定するということとは非常に困難でもあり、かつ実用的価値も乏しいことである。したがつて、耐コロナ性のすぐれた絶縁をうるという実目的に対しては、本章までに明らかにしてきた諸特性を考え、最終的には

実用せんとする絶縁構造あるいはそのモデルにより性能を検討してゆくことが必要であるものと考えられる。

## 6. モデルコイルによる耐コロナ性の検討

### 6.1 目 的

前章までに明らかにした諸特性は定性的なものであり、これと実際の絶縁において生ずる現象との関連を明らかにする一つの実験として、モデルコイルによる耐コロナ性の検討を行なつた。1～2枚の薄いシート状絶縁材料を使用する前章までの実験と実際の絶縁構造とのコロナ放電条件の差異としては、たとえばボイド寸法を同一とし、ボイド厚さを含む印加電界強度を同一としても、ボイドとそれに直列な絶縁の厚さとの比が異なっており、絶縁厚が小さいとボイド放電が開始すると同時に絶縁材料にかゝる電界強度は不連続的に急上昇し、また放電電力も大きくなる。したがつて、絶縁厚の小さいモデル実験では絶縁材料に印加される電界強度が比較的小さい状態で、コロナ放電をうける場合の実験を行なうことはできないこととなる。このほかに構造上の差異もあるし、また特にボイド内への空気の流通は実際の場合には非常に小さいのが普通であり、かつまた非常に複雑である。本章で述べるモデル実験はこの点かなり実際の電動機コイル絶縁等と近い条件となるようにしたものである。

### 6.2 ボイド孤立性の検討

さきに、コロナ劣化の初期の均一消耗過程は酸化であり、酸素の供給がない場合には消耗速度は小さくなるが、A過程からB過程への

移行は一般に空气中より早く、すなわち消耗量が少ない状態で起こる傾向があることを見い出している。これらが實際上どのような特性となるかを検討するために次のような実験を行なった。すなわち、 $25 \times 2 \text{ mm}$  の断面をもつ銅条を導体とし、絶縁テープを巻くものであるが、一つは絶縁の銅条に近い内側半分には無処理の絶縁テープを巻いて、ボイドのある状態とし、外側半分は接着剤とともに巻いてボイドなしの状態とし、かつ内部のボイドはコイル両端で気密としたものである。他はこれとは逆に内側半分为ボイドなしとし、外側半分にボイドありの状態とし、かつこのボイドが外気と連つている状態としたもので、この2種類について実験を行なった。これらに一定電圧を印加し破壊に至るまでの寿命を求め、これを表 1.6.1 に示した。表より両者の放電の大きさはほぼ等しいにもかかわらず、孤立ボイドをもつものは開放ボイドをもつものより著しく寿命が長いことがわかる。またその寿命の比もさきに求めた表 1.5.10 等から推定される値よりも大きく、孤立ボイドの場合には単に酸化消耗が起こりにくいという点以外に、表面状態の変化等により、局部侵食への移行もおそくなることが生じたものと考えられる。しかし、いずれにしても実用上非常に好ましい結果であり、ボイド孤立は耐コロナ性を改善するための必要条件と考えられる。なお、マイラとテフロンとにつき、絶縁全体を接着剤とともに巻いたものでは絶縁厚は約  $1 \text{ mm}$  となり、表 1.6.1 に示すものと同様に  $80^\circ\text{C}$  のもとで  $3.3 \text{ kV}$  を  $1000$  時間 ( $1.5 \text{ kc}$ ) 印加しても破壊に至らず、このものを解体しても全然劣化のあとは見られず、絶縁物中にわずかのボイド (真空含浸ではなく手巻きによる塗込みのため微小ボイドの発

生はさけられない)が存在しても、外気の供給がなければ  $3\text{kV}/\text{mm}$  程度の電界では異常なく長期間使用できることが明らかとなつた。

表 1.6.1 モデルコイルのコロナ放電による破壊までの  
寿命に及ぼすボイド孤立性の影響

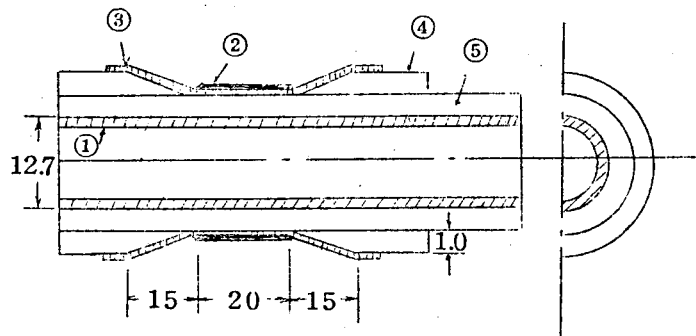
( $80^\circ\text{C}$ ,  $3.3\text{kV}$ ,  $1.5\text{kc}$ )

ボイド位置, 状態	絶縁材料の材質	放電電力 ( $\text{W}/35\text{cm}^2$ )	破壊時間 (h)	絶 縁 厚 (mm)
絶縁の外側 半 分, 開 放	マイラ	1.32	8.5	0.67
		1.67	7.8	
		1.75	7.4	
	マイラ	1.45	6.0	0.72
		0.55	11.5	
		0.67	9.3	
		0.71	10.0	
平均		1.16	8.7	
外側半分, 開 放	テフロン	0.91	2.1	0.71
		1.26	11.1	
		1.02	9.7	
		0.99	90.5	
平均		1.05	28.4	
絶縁の内側 半 分, 孤 立	マイラ	0.78	350.0	0.85
		1.08	438.0	
		1.00	163.5	
		0.97	126.1	
平均		0.96	269.0	
内側半分, 孤 立	テフロン	0.68	145.2	0.69
		0.75	151.5	
		0.73	183.5	
		0.49	349.5	
平均		0.66	208.0	

### 6.3 シリコン処理の影響

前章にも述べたように、シリコンによつて絶縁材料の表面処理を行なう場合には、面全体を均一に処理することが必要である。

ここでは試料の構造を厳密なものとするために、図 1.6.1 に示すように導体として銅管を使用してモデルコイルを作製した。絶縁は 2 ミル ( 0.051 mm ) 厚マイラテープにシリコンワニス焼付けたものと無処理のものとの 2 種類であり、これらを 0.3~0.5 mm のネガティブラップに巻いたものである。印加電圧、温度、ならびに電



- ① 電 極 ( 1/2" 銅管 )
- ② 電 極 ( アルミ箔 )
- ③ 低抵抗導電塗料
- ④ 補強絶縁 ( テープ巻 )
- ⑤ 主絶縁

図 1.6.1 コロナ劣化実験用モデルコイル

源周波数は前節の場合と同じくそれぞれ 3.3kV, 80℃, 1.5kc である。実験結果を表 1.6.2 に示した。前述のように、シリコンも塗りむらがあれば逆効果の場合もありうるが、本実験ではシリコン処理のものが悪くなる結果は得られなかつた。シリコン処理のものはシートの有効厚が大きくなるため同一枚数のものを比較

することはできないが、試料(C)と(E)とを比較すれば、(E)の方が絶縁厚が小さいにもかかわらず寿命は10倍以上となり、シリコンの効果は顕著である。またシリコン処理のものは低電界で著しく寿命が長くなることが認められ、またすでに明らかになったように、ボイドの角の影響は低電界下で緩和されることより、通常実用される電界強度の範囲では、シリコン処理は耐コロナ性向上対策として非常に有効であるものと結論される。また、この実験では薄いテープを円筒状導体に緊密に巻いたことによるコロナ開始電圧向上の効果も現われているものと考えられ、実用上この点も重要なことである。なおこの実験においてはボイドが外部と流通し、かつシリコンの放電による酸化速度はきわめておそく、ボイド内でガス組成が著しく変化することは起こらないと考えられることから、表1.6.2の結果を商用周波に換算すれば周波数の倍数(30倍)だけ大きい値に相当するものと考えられる。

表 1.6.2 モデルコイルのコロナ放電による破壊までの寿命  
(マイラ絶縁, 空气中 80°C, 3.3kV, 1.5kc)

No.	絶 縁	平均厚(mm)	寿 命 (h)					平均
A	無 処 理 10 枚	0.549	14.5	16.1	14.1	15.4	18.2	15.6
B	〃 12 〃	0.661	21.1	16.1	20.5	22.4	22.3	20.5
C	〃 14 〃	0.776	33.5	33.4	33.5	29.3	30.3	32.0
D	シリコン処理10枚	0.593	49.0	39.5	44.3	45.4	92.3	54.1
E	〃 12 〃	0.720	518	212	420	305	403	372
F	〃 14 〃	0.846	1278	513	1782	540	930	965



#### 6.4 総 括

以上のモデルコイルについての実験により、さきに考察したコロナ劣化機構についての考え方が妥当であることを確かめ得たものと考えられる。さらに実用的な効果として、絶縁構造中のボイドは外気から遮断されていれば絶縁上の大きな弱点とならないこと、ならびに耐コロナ性を改善する対策として、樹脂薄膜にシリコン処理をすることは、使用電界強度が現行の機器の約2倍程度までは非常に有効であること等が明らかになった。

### 7. 実用絶縁物のコロナ劣化特性<sup>(3)(15)</sup>

#### 7.1 目 的

発電機コイル絶縁等には、古くから主として耐熱性ならびに熱伝導性を向上させる目的でマイカ等の無機質が使用されているが、耐コロナ性という点でもこのように無機質を組み合わせたものは非常にすぐれたものである。すなわち、無機絶縁材料は安定な酸化物であつて、特に大きな放電をうけない限りその寿命は無量大とみなしうる。このことは、コロナ劣化実験用セルのガラス板ならびに図1.2.2等の電極にはり付けしたマイカ板等が非常に長時間の寿命を有することからも推定できることである。一般に、無機絶縁材料がコロナにより絶縁破壊するのは有機質と異なり、主として放電による熱作用によつて局所的な機械的歪を生じ、龜裂が生じて破壊するというのが普通の形態である。<sup>(64)</sup> このほか油等がある場合には、コロナ放電により化学的におかされることも報告されているが、<sup>(65)</sup> このような場合にも有機材料より著しく寿命が長いのが普通である。し

かし、一方無機絶縁材料は加工が困難であり、またマイカ等では組成不均一による弱点も多いので、多数重ね合わせ、間に樹脂を注入して組合わせ絶縁物として使用するのが普通である。ここではこれらマイカ組合わせの実用絶縁物について耐コロナ性を検討し、すぐれた性質を確認することができたのでその検討結果を述べる。

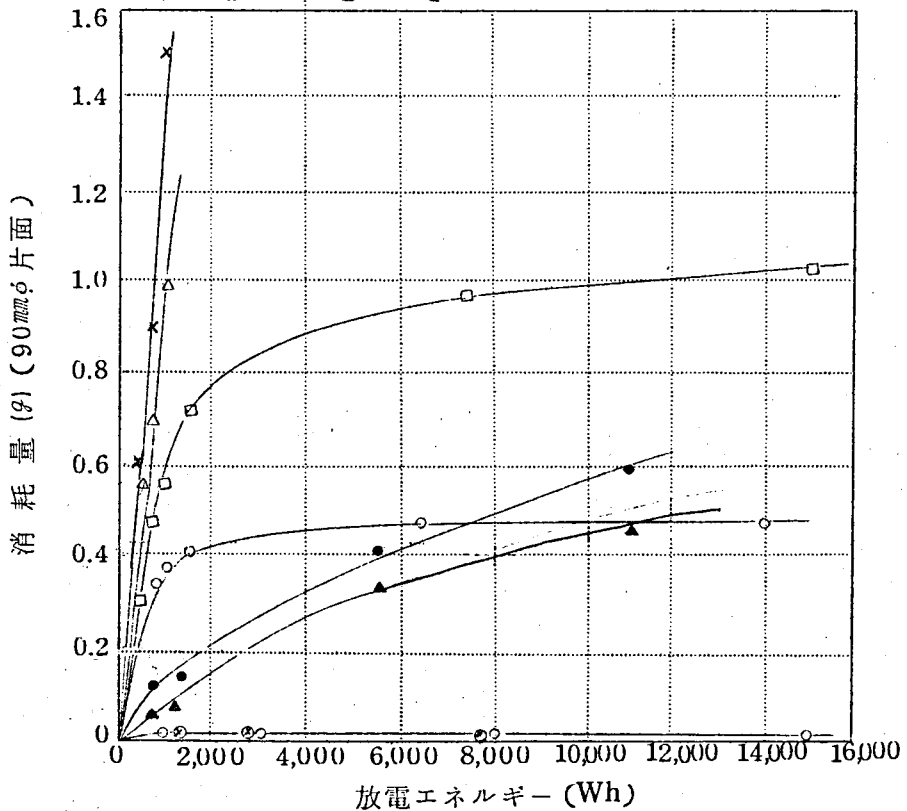
## 7.2 実験法

試料はマイカペーパーならびにガラスクロスにポリエステル樹脂を含浸成形したもの、同様な構造でエポキシ樹脂を含浸成形したもの、ならびにポリエステル樹脂にマイカ粉あるいはまたアスベスト粉を約50%混入して成型したもの等である。実験はガラスセルを使用した非破壊の実験法をとつた。温度は50, 90 ならびに130℃の3種について行ない、電源は1.5kCを使用し、乾燥空气中で実験を行なつた。なお電界強度は試料厚によつて異なるが、放電時の放電間隙の電圧降下を無視して考えると、 $4.5 \sim 6 \text{ kV/mm}$  であり、特にマイカペーパー組合わせ品では試料が薄いために高電界となつており、実用されるよりもかなり高い値である。

## 7.3 消耗特性

特に長時間まで行なつた代表的な結果を図1.7.1に示した。50℃ならびに130℃の場合にも傾向としては図1.7.1と全然差のない結果が得られている。図中、樹脂単独のものでは減少重量の絶対値はただちに意味のある数値であるが、他のものはこの減少重量の傾向に意味があるのみで、絶対値は特に意味のあるものではない。すなわち、マイカ組合わせのものでは、マイカ上の樹脂が消失するとそれ以上内部まで放電の影響が及ばないために、消耗は飽和の傾向

を示すものであつて、このことは非常に重要な特性であるが飽和値自体はマイカ上にあつた樹脂の量を示すにすぎない。したがつて、試料の作り方によつてその量は自由に変えることができ、このような試料の消耗量を実験前の重量に対する割合で表わす等のことは適当でない。したがつて、図の特性からはこの構造の絶縁で、ポリエステル樹脂とエポキシ樹脂との優劣をきめることはできず、両者ともすぐれた性能ということが出来る。

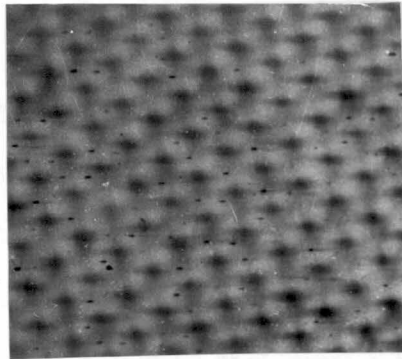


- x : エポキシ樹脂単独
- Δ : ポリエステル樹脂単独
- : ガラスクロスにポリエステル樹脂を含浸成形
- : ポリエステル樹脂にマイカ粉を混入
- ▲ : " " アスベスト粉を混入
- : マイカペーパーにポリエステル樹脂を含浸成形
- ⊙ : " エポキシ樹脂 " "

図 1.7.1 実用絶縁物の長期のコロナ劣化特性

注) 実験条件 電極: ガラスセル 雰囲気: 乾燥空気(シリカ粉入)  
温度: 90°C 電界: 4.5~6kV/mm

ガラスクロス of 組合わせ品では、最初は上面の樹脂が消失し、ついでガラスクロス of 網目の中まで侵食孔は進展し、ついには貫通するに至る。侵食孔の貫通した状態の一例を図 1.7.2 に示した。さらに放電を続けると、樹脂がほとんど消失するために消耗量が飽和の傾向を示すものである。後述するように侵食孔の貫通は比較的早く起こっており、ガラスクロスを併用したのみでは耐コロナ性はそれほど改善されないものと考えられ、ガラスクロスは機械的ならびに熱的にすぐれた特性を利用した使用法をとるべきであると結論される。



(×5)

図 1.7.2 ガラスクロスにポリエステル樹脂を含浸成形したもののコロナ侵食孔の貫通状況

注) 微細な黒点群が貫通孔を示すものである。  
斜光線で撮影してあるため位置が若干ずれてみえるが孔は網目に存在する。

マイカ粉、ならびにアスベスト粉を混入したものは、表面の樹脂が消失するとその後の消耗速度は非常に小さくなるが、飽和の傾向は示しておらず、これは長時間のコロナ放電によつては次々に粉末

が飛散するためである。しかし、その消耗速度は樹脂単独の場合と比較すれば、 $1/30$  以下であり、しかも局部的侵食孔進展の過程に移行しやすい傾向も認められないので、無機質粉末混入は有力な耐コロナ性改善策と考えられる。ただし、このものでは粉末混入により、硬化前の粘度が上昇し作業性が低下するので、その使用される場所にはおのずと制限がある。なおこのように無機質と樹脂との組合わせ絶縁を作製する場合には、両者の接着性が重要な問題である。すなわち、たとえばガラスクロスシリコン樹脂成形品では、両者とも材質的には耐コロナ性がすぐれているが、組合わせ状態では耐コロナ性がよくないことが知られている。<sup>(43)</sup>

#### 7.4 誘電特性の変化

樹脂単独の場合にはコロナ放電をうけても内部までの変質が起こらないことはすでに明らかにされている。ここでマイカペーパーと樹脂との複合絶縁物の誘電特性を求めても、その組合せの定量的組成が明らかでなければ正確な解析はできないが、定性的な検討を行なうために、測定結果の一例を図 1.7.3 に示した。これは同一試料についての測定でなく、試料間のばらつきを考慮する必要があるが、一般的にいえることは、コロナ放電をうけることにより誘電正接特性はむしろよくなる傾向を示しており、これは樹脂の消耗によりマイカの占める割合が多くなり、マイカ自体の値に近づいているためと考えられる。またこの場合にはマイカ片の間に放電生成物が侵入し、低周波の誘電正接の増大の起こることが懸念されたが、実験した範囲ではそのような現象も起こらず、良好な結果であつた。なお、図 1.7.4 に固有抵抗の変動の一例を示したが、変動は試料差に

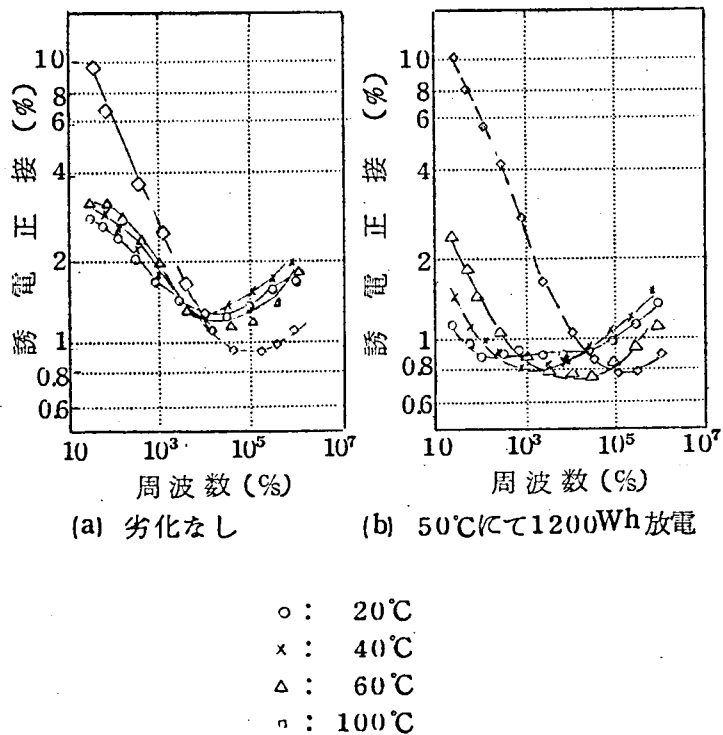


図 1.7.3 マイカペーパーにポリエステル樹脂を含浸成形したものもののコロナ放電による誘電特性の変化

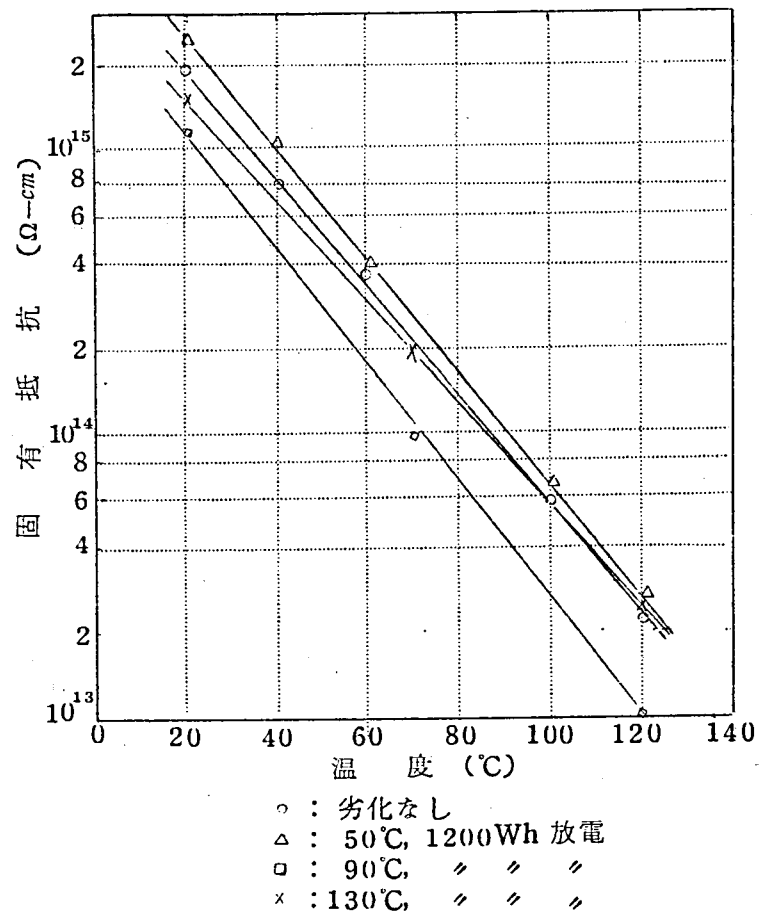


図 1.7.4 マイカペーパーにポリエステル樹脂を含浸成形したものもののコロナ放電による固有抵抗の変動

よるばらつきの範囲内であり、コロナ放電をうけることによつては、固有抵抗はほとんど低下しないものと考えられる。

### 7.5 絶縁耐力の変動

測定は図 1.7.5 に示すような方法により油中で行ない、破壊電圧測定結果を表 1.7.1 に示した。マイカ組合わせ品ならびに無機質粉末入りのものでは絶縁耐力の低下はほとんど起こらないものと結論される。ただし、ガラスクロス組合わせ品では、50℃で約 900 Wh, 90℃で約 700 Wh, 130℃で約 400 Wh 程度の放電量に達すると侵食孔が貫通するに至り、それ以後の破壊値は測定時媒質とした油の破壊電圧を示すことになる。なお実験結果のばらつきはかなり大きい、測定の際には試料内部に油の浸入するのを防ぐために、表面に酢酸セルローズを約 5  $\mu$  厚に吹きつけて付着させているにもかかわらず、試料のうちには油の入るものもあり、このことも誤差の原因となつたものと考えられる。しかし、実験結果のばらつきの最大の原因は試料間の構造のばらつきと考えられる。すなわち、マイカと樹脂とが交互に重なつた状態の試料でも初期には全体とし

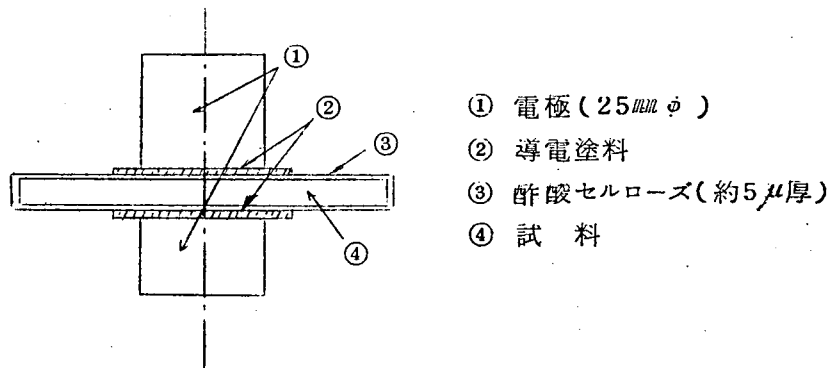


図 1.7.5 コロナ劣化後の破壊電圧測定用電極装置

表 1.7.1 実用絶縁物のコロナ劣化実験後の破壊電圧

実験温度 (°C) エネルギー 厚さ (Wh/cm²) BDV			50		90			130	
		0	600	1200	600	1200	15000	600	1200
マイカペーパに	(kV)	12.6	11.9	11.9	10.1	14.2	11.0	10.9	11.2
ポリエステル樹脂	(mm)	0.229	0.189	0.219	0.174	0.257	0.205	0.214	0.234
を含浸成形	(kV/mm)	55.0	63.0	54.5	58.0	55.3	53.6	51.0	48.0
ポリエステル樹脂	(kV)	26.5	19.5	21.5	28.0	20.0	18.0*	20.5	20.5
にアスベスト粉	(mm)	0.573	0.572	0.656	0.650	0.518	0.550*	0.462	0.588
を混入	(kV/mm)	46.3	34.1	32.8	43.1	38.6	32.8*	44.4	34.9
ガラスクロスにポ	(kV)	12.4	8.6	2.1	6.9	2.1	—	2.2	2.2
リエステル樹脂を	(mm)	0.324	0.317	0.326	0.353	0.340	—	0.359	0.367
含浸成形	(kV/mm)	38.3	27.1	6.4	19.6	6.2	—	6.1	6.0

注) \* 11,000 Wh のものについての値である。

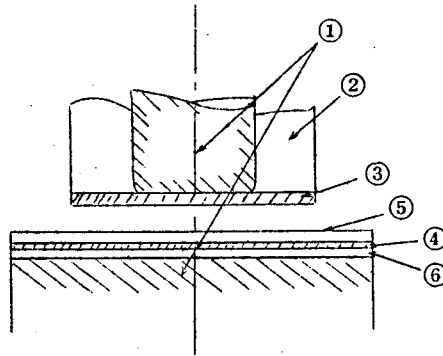


てほぼ均一な厚さとなつているが、マイカ上の樹脂が消失した後はマイカペーパーの不均一がそのまま破壊電圧に影響を与えるものと考えられる。

これらの劣化実験が、実際の機器の絶縁の何年間の使用に相当するかということは一概に表わすことはできないが、特性のあまりよくないコイル絶縁と比較しても、この実験では放電間隔ならびに電界強度の関係で数倍～十倍程度に加速され、また印加電圧の周波数によつては30倍加速され、実験では15,000Wh/90°の放電を与えるには約1500時間を要していることより、コイル絶縁に換算して約300,000時間、すなわち約35年に相当するものと考えられ、このことからマイカ組合わせ絶縁が非常にすぐれていることを推定することができる。

#### 7.6 マイカと樹脂との重ね方についての考察

前述のように、マイカと樹脂との組合わせ絶縁は非常にすぐれた耐コロナ性をもっている。しかし、実用するに当つては前述のように接着性等を考慮することはもちろん必要であるが、このほか特に重ね方に注意することが必要である。すなわち、コロナ劣化の初期の均一消耗の過程では、マイカの均質部分では実用的に劣化は起こらないといふことができる。しかし、樹脂中で侵食孔が生長しBならびにC過程となつてマイカ面に到達した場合には、マイカの優秀な耐コロナ性をもつてしてもそれを阻止することは困難であり、絶縁破壊に至る場合が多いものと考えられる。この点を検討するために図1.7.6の試料構成によつてコロナ劣化の実験を行なつた。この場合に下部マイカ $M_2$ 上のマイラ $m_1$ が厚い場合には、マイラ中



- ① 電 極
- ② 保護絶縁
- ③ マイカ ( 0.1 mm 厚 ) ( $M_1$ )
- ④ マイカ ( 0.015 mm 厚 ) ( $M_2$ )
- ⑤ マイラ ( $m_1$ )
- ⑥ マイラ ( $m_2$ )

図 1.7.6 コロナ侵食孔先端の電界強度検討用電極装置

で局部的侵食孔が生ずると、その侵食孔は瞬時にのびて下部マイカ  $M_2$  を貫通するに至る。この際もちろん上部電極にけり付けたマイカ  $M_1$  は破壊せず、全路破壊とはならないものである。同一印加電圧のもとでも、 $m_1$  が薄い場合には  $M_2$  は破壊せず、長時間の放電では  $m_1$  は消失し、 $M_2$  の全面が露出されることになる。次にまた、下部マイラ  $m_2$  が厚い場合には、 $m_1$  を厚くしても次才に  $M_2$  は破壊しにくくなり、 $m_2$  がある程度以上となれば、印加電圧を上げない限り  $m_1$  に関係なく  $M_2$  は破壊しにくくなる。このような現象が起こる機構は次のように考えられる。すなわち、 $m_1$  に侵食孔が貫通し  $M_2$  に達すれば、先端の寸法は別として、放電時に放電空間が等価的に導体化すると考えられるため、先端と下部電極との間に印加される電圧は、静電容量による電圧分担の関係上、 $m_1$  が厚いほど高い電圧に

なるものと考えられる。この場合の侵食孔先端の  $M_2$  中の平均電界強度の計算結果を図 1.7.7 に示した。さらにまた、この際の侵食孔先端の寸法は非常に小さく、破壊後の試料をみてもその直径は最大数ミクロンと考えられ、電界強度はさきに求めた平均値よりかなり大

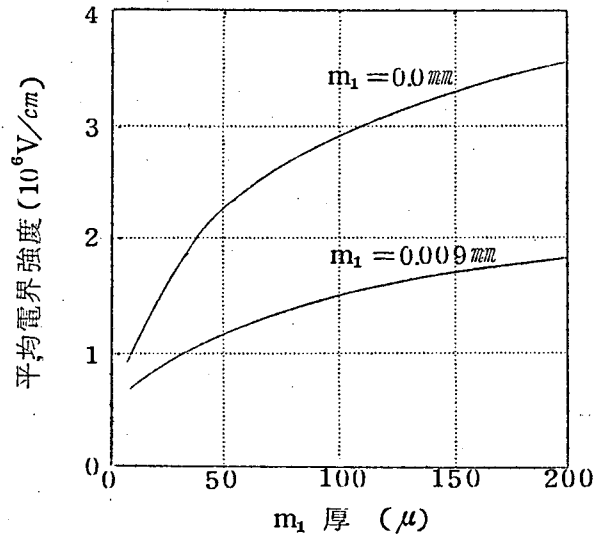


図 1.7.7 侵食孔が  $M_2$  まで達したときの先端の平均電界強度

きくなるものと考えられる。ここで先端の曲率半径をパラメータとし、侵食孔が  $M_2$  に達したときの電界強度を (1.7.1) 式<sup>(6)</sup> によって計算した結果を図 1.7.8 に示した。

$$E = \frac{2 V_0 \xi_0}{a_1 (1 - \xi_0^2) \ln [(1 + \xi_0) / (1 - \xi_0)]} \quad (1.7.1)$$

ここに、 $E$  は先端の電界強度、 $V_0$  は印加電圧である。また  $R$  は先端の曲率半径であり、 $a_1$  は先端と電極との距離であつて、 $R = a_1 (1 - \xi_0^2) / \xi_0^2$  すなわち  $\xi_0^2 = a_1 / (a_1 + R)$  の関係がある。

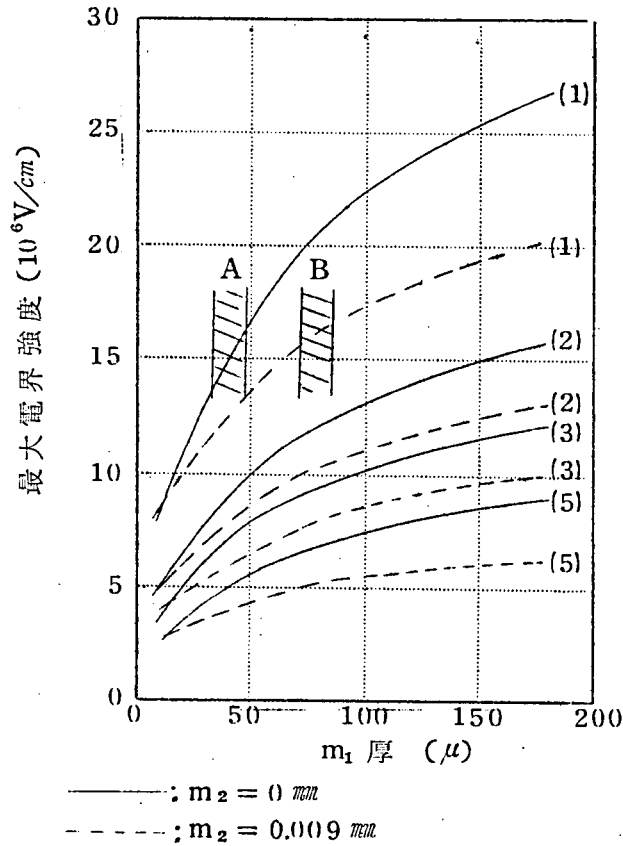


図 1.7.8 侵食孔が  $M_2$  に達したときの先端の最大電界強度

注) (1) ( ) 内の数値は侵食孔先端の曲率半径 ( $\mu$ )

(2) A, B は  $m_2$  が 0 ならびに 0.009 mm の時  $M_2$  が破壊する限界の  $m_1$  の値を示す。

実験結果は印加電圧 5 kV において、 $m_2 = 0$  では  $m_1 = 1.5$  ミル (0.038 mm) 以上で  $M_2$  が破壊し、 $m_2 = 0.009$  mm では  $m_1 = 3$  ミル (0.076 mm) 以上で  $M_2$  が破壊する。これらの実験において、いずれの場合にも  $M_2$  に達したときの侵食孔は C 過程となつているものとし、かつ侵食孔の曲率半径は等しいものとする、図 1.7.8 よりその曲率半径は約  $1 \mu$  となる。この値はもちろん精度の高いものではない

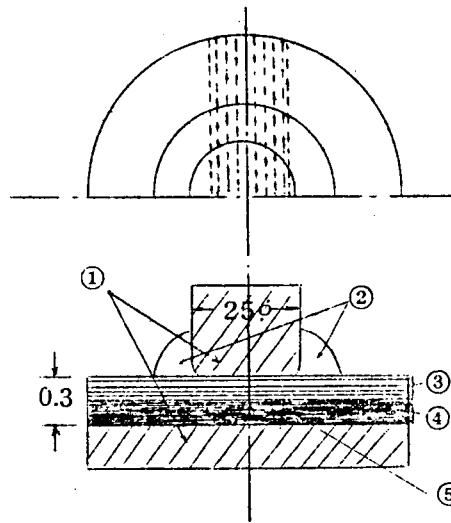
が、すでに報告されている別な実験結果<sup>(14)</sup>とも一致するものであり、また図 1.7.8 より得られるこのときのマイカの本質的強度の値も合理的な値と考えられ、このことから以上の考察の妥当性が推察される。

次に実際の場合に一步近い実験として、図 1.7.9 に示す実験を行なった。すなわち、マイカとマイラとを交互に重ねた場合と、それぞれ一括して重ねた場合とについて、両者ともボイド量を等しくし、同一電圧を印加してコロナ放電による破壊までの寿命を求めたものである。結果は表 1.7.2 に示すように、当然交互重ねの場合の方がすぐれている。ただし、この場合にはコロナ侵食孔がマイカに達したとき、マイカに対しては C 過程となつておらず、B 過程としてエネルギー密度の大きい放電が起こり、発熱作用も伴つて絶縁破壊となつたものと考えられる。

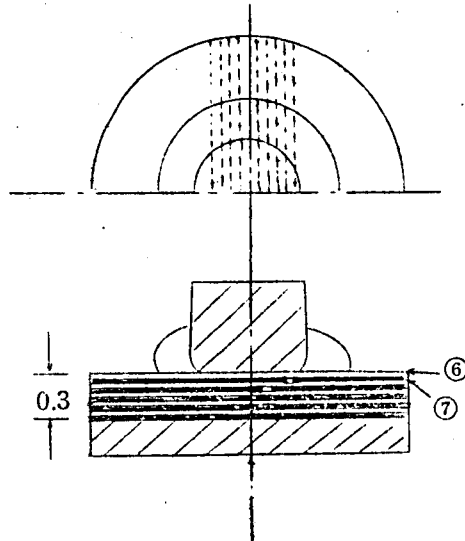
表 1.7.2 マイラーマイカ積重ね条件による寿命の差異

(乾燥空气中(シリカゲル入), 70℃, 1.5kc電圧)

試料状態	印加電圧 (kV)	コロナ破壊寿命 (h) (平均)			
一括積み重ね 図 1.7.9 (a)	6.0	3.6	2.3	3.3	3.1
	5.5	11.0	10.5	9.8	10.5
交互積み重ね 図 1.7.9 (b)	6.0	8.7	9.3	10.0	9.3
	5.5	21.0	22.5	18.5	20.6



(a) マイラーマイカ各一括重ね合わせ



(b) マイラーマイカ交互重ね合わせ

- ① 電 極
- ② 保護絶縁
- ③ マイカ (0.02 mm 厚, 5 枚)
- ④ マイラ (0.038 mm 厚, 5 枚)
- ⑤ ボード (約 2 mm 幅)
- ⑥ マイカ (0.02 mm 厚)
- ⑦ マイラ (0.038 mm 厚)

図 1.7.9 マイラーマイカ組合わせ実験用電極装置

以上より、絶縁体内のボイドの一部から発生した侵食孔がのびると、先端における平均電界強度は単に残存厚さから考えたより以上の高電界となり、さらにまた先端が非常に鋭いため電界強度はいつそう大きくなり、マイカ等の耐コロナ性のすぐれた無機絶縁材料でも、その進展を阻止するのは困難であることが実験的にも明らかとなった。この特性は実用的には非常に重要な結果である。

## 7.7 総 括

以上の実験ならびに検討結果により、現在一般に発電機コイル絶縁等に使用されているマイカと樹脂とを組合せた複合絶縁の耐コロナ性はきわめてすぐれていることが明らかとなった。すなわち、マイカペーパにポリエステル樹脂あるいはエポキシ樹脂等を真空含浸し成形したものでは、コロナ放電によつて樹脂中に侵食孔が生じても、マイカによつてその進展が阻止され、コロナ放電が続いても長期間の使用に耐えることが明らかとなった。これに対し、ガラスクロスとの組合わせ品では、侵食孔は網目をぬつてのび、ガラスクロスによる耐コロナ性の改善はほとんど期待できないものである。このほか、樹脂中に50%程度の無機絶縁材料の粉末を混入したものは、耐コロナ性が著しく改善され、機器の補助的絶縁、たとえば発電機コイル端における隣接コイル間のコロナ防止用絶縁等、加工性の要求度がそれほど大きくない場合には有効なものであることが明らかとなった。ただし、マイカとの複合絶縁では、その構造として樹脂とマイカとができるだけ薄く交互に重なつた状態とすることが必要であり、特に使用電界強度が大きいときにはこの点に注意することが必要である。

## 8. 乾式高圧絶縁の耐コロナ性を改善する一方法

前章までに述べてきたように、固体絶縁材料のコロナ劣化の現象はその使用状況によつても種々特性が変化し、耐コロナ性を改善する方法も具体的にはかなり違つたものとなる。ここでは発電機コイル絶縁を対象として、耐コロナ性を改善する方法について考察してみる。

もちろん定性的な一般論としてはすでに述べたように、ボイドをできるだけ生じないようにし、わずかに存在するボイドに対しては、自己回復作用のように使用中ボイド放電が減少するような材料ならびに構造を選び、さらにまた多少のコロナ劣化が起こるとしても、コロナによる絶縁材料の均一消耗の速度をできるだけ遅くすると同時に、均一消耗から不均一局部侵食の形式に移行しないようにすることが、耐コロナ性を改善する基本的な対策である。

発電機コイル絶縁の耐コロナ性を改善する方法として次のものをあげるができる。

### (1) マイカと樹脂とを併用すること。

前章に示すように、マイカの耐コロナ性は有機絶縁材料とは比較できないほどすぐれたものである。しかし、樹脂とマイカとを併用するに当つては、両者ができるだけ薄く交互に重なる状態とすることが必要であつて、この方法によりボイド内でコロナ放電が起こつたとしても、その侵食がBあるいはC過程となつて絶縁体を貫通してゆくのを阻止することができる。要するに、マイカの熱伝導性、耐熱性ならびに耐コロナ性はきわめてすぐれており、実用的にはその長所を十分生かすような使用法をとるべきである。

### (2) ボイドの発生を極力少なくすること。



コロナ放電による劣化を避けるためには、ボイドをできるだけ少なくすることが望ましいのは自明の理であるが、このことは製作時に生ずるボイドのみに限らず、使用中にもボイドの発生が極力少ないような材料、構造ならびに製作法を選ぶことが必要である。現在一般に採用されている無溶剤ワニス真空含浸成形の方法は、この点非常にすぐれた製作法である。すなわち、ボイドを少なくすると同時にたとえ微小ボイドが生じたとしても、これを外部から孤立させ、またボイド形状として角のあるようなものがなければ、ボイドの寿命に及ぼす影響は小さいものとなる。

(3) 耐熱性ならびに機械的特性のすぐれた樹脂を選ぶこと。

一般にマイカを併用した絶縁では、純粹に熱劣化のみ、あるいはコロナ劣化のみによつて絶縁破壊に至ることはまれであつて、通常は熱劣化によつてボイドが生じ、そのためにコロナ劣化が起こり、両者の復合作用によつて破壊に至る場合が多い。したがつて樹脂も単一素材の状態で耐コロナ性がすぐれていても、使用中に熱的あるいは機械的歪により龜裂等の発生するものでは、絶縁構造とした場合の耐コロナ性を期待することはできず、結局実用的意味の耐コロナ性は他の性質と独立ではあり得ないものである。

また、一般に絶縁材料の耐コロナ性は均一消耗の起こる速さと、消耗形式が均一なものから局部的なものに移行する条件とによつて左右されるが、有機絶縁材料では後者の性能の差異によつて耐コロナ性の優劣の大勢が決まるものである。これに対し、マイカを併用する絶縁ではマイカによつて後者の性能を改善することができるため、マイカと併用する絶縁ワニスとしては、素材としての若干の耐

コロナ性の差異よりも、作業性がよく、耐熱性ならびに機械的特性のすぐれたものを選ぶことが必要である。また絶縁に対する一般的要求としては、熱伝導性の良好なものであることが必要である。

以上の条件は現在ではほとんど実現されているが、今後はさらに樹脂の性能をすぐれたものとする必要がある。このようにして得られた絶縁構造では、現在の使用電界強度よりかなり高い電界下で使用し、30年の寿命を期待することも困難でないものと考えられる。

## 9. 結 言

以上はボイドコロナを対象として固体絶縁材料のコロナ劣化機構についての検討結果ならびに耐コロナ性を改善する方法等についての検討結果を述べたものであるが、本研究によつて明らかとなつた主なる事項を列挙すると次のようになる。

- (1) コロナ劣化は絶縁材料の表面から起こる侵食消耗の現象であり、材質的变化は内部まで達しないものである。
- (2) コロナ劣化の一般的形態としては、まず最初に表面から均一に消耗が起こり、この過程の中では特定な弱点は生じないが、次才に表面が粗れ、表面上の微小凹みには放電電力の集中が起こつてその部分が局部的侵食孔としてのび、遂にはその侵食孔の先端の電界強度が絶縁材料の本質的強度に達し、急速に絶縁破壊に至るものである。ここで時間的には大部分を最初の均一消耗過程が占めるものであり、実用的な意味の耐コロナ性に対しては、最初の均一消耗の起こる速度と、均一消耗から不均一局部侵食へ移行する時期とがもつとも重要なものである。

- (3) コロナ放電による絶縁材料の消耗は、酸素の存在する雰囲気のもとでは一種の酸化反応であり、窒素中ならびに水素中等での消耗速度は空気中の場合より約1桁小さくなる。なお、このような酸化によつて発生するガスは、有機絶縁材料の場合炭酸ガスと水とが大部分を占める。
- (4) コロナ放電によつて起こる酸化消耗の機構は、電子ならびにイオンの衝撃により絶縁材料表面の分子が活性化状態となり、同時に放電空間においては活性化状態の酸素が生成され、両者の結合が容易に起こるものであり、さらにこれらが電子ならびにイオンの衝撃をうけて気化消耗するものと考えられる。
- (5) 空気中のコロナ放電によつては窒素の酸化物が生じ、特にその生成速度は絶縁材料から発生する水分によつて加速される。この窒素の酸化物は、絶縁材料表面に付着して表面状態を変化させ、結局放電の様式を変化させてコロナ劣化の様相を変化させる働きがある。代表的な作用として、コロナ放電による消耗速度を変動させることと、侵食形式の移行条件を変化させることとがあげられる。
- (6) コロナによる酸化消耗の速度は、放電電力の大小による酸素の消耗の速度と、外部から供給される速度とに関連し複雑な特性を示し、特にこの需給の関係がある特殊な状態となるとき消耗速度の最大の状態が起こる。
- (7) コロナ放電による酸化消耗の見かけの活性化エネルギーは著しく小さく、通常の熱酸化の場合より約1桁小さくなる。またこれは放電間隙長によつても変動し、間隙長の小さいほど見かけの活性化エネルギーは小さくなる。

- (18) 均一消耗から不均一局部侵食形式へ移行する時期を左右する最大の要因としては、放電時の試料の表面抵抗がある。すなわち、表面の抵抗が一様に低下すると、放電時表面に生じた微小凹みの中では、印加電界方向の衝突のエネルギーが減少し、またその部分で放電が起こる可能性も減少し、結局、局部的侵食孔の進展が起こりにくくなり、寿命が長くなる。
- (19) 放電の雰囲気が高湿度となると、試料面には微小水滴の付着等表面状態の不均一が起こり、エネルギー密度の大きい放電が生じ、かえって寿命が短くなるに至る。したがって、一般にコロナ放電による破壊までの寿命はある湿度において最大となる。ただし、この湿度は放電空間における値が問題であり、電圧ならびに周波数に変動し、放電電力が変動した場合には放電部の温度が変わり、その部分の有効湿度が変わるため寿命の最大値を与える見かけの湿度値の変動が起こるものである。
- (10) テフロン耐コロナ性がよくないことのひとつの原因としては、放電時表面抵抗の一様な低下が起こりにくく、さきに述べた局部侵食孔の発生ならびに進展を防止する作用が生じないためと考えられる。なお、発生水分による表面状態の変化と耐コロナ性とのこのような関係は、一般に他の材質についても成立するものと考えられる。
- (11) テフロンのように耐コロナ性のよくないものでも、雰囲気中に酸素のない状態として消耗速度を小さくし、また表面抵抗が一様に低下するような処理剤を使用すれば、耐コロナ性は著しく改善される。
- (12) ボイド内に角があれば放電時この部分の電界強度は大きくなり、ここから侵食孔が生ずるため破壊までの寿命は短くなる。

- (13) 同一構造ならびに寸法のボイドが存在しても、空気の流通のないものとあるものとでは、コロナ放電による破壊までの寿命は前者の方がはるかに大きくなる。
- (14) 積層絶縁において、シリコーン処理を行なうことは、特に高電界下で使用する場合を除き有効な耐コロナ性向上法である。
- (15) 実用絶縁として、マイカと樹脂とを併用したものはきわめてすぐれた耐コロナ性を示すが、ガラスクロスを併用してもほとんど耐コロナ性の改善を期待することはできない。また、マイカ粉等の無機質粉末を 50 % 程度樹脂に混入したものの耐コロナ性は著しく良好である。
- (16) 発電機コイル絶縁を対象とし、耐コロナ性を改善する対策の基本的な考え方を明らかにすることができた。すなわち、マイカと樹脂とを併用し、しかもマイカと樹脂とはできるだけ薄く交互に重なった状態とし、また樹脂としては耐熱性ならびに機械的特性のすぐれた無溶剤のものを真空含浸することにより、耐コロナ性のすぐれた絶縁をうることができる。

コロナ劣化の現象は非常に複雑であり、これの完全な解明については今後の研究にまつべきところが多い。また本研究の内容は主として定性的なものであるが、これによつてコロナ劣化機構ならびに耐コロナ性を改善する対策等の大要は明らかになつたものと考えられる。

## オ 2 部      低ガス圧ケーブルの自己回復作用を中心 とした絶縁特性についての研究

### 1. 緒      言

低ガス圧ケーブルは 20~30 kV の電力系統に使用されるケーブルであり、その構造はソリッドケーブルと同様に乾燥含浸された紙絶縁ケーブルの内部にガス通路をもうけ、ゲージ 1 気圧の窒素ガスを直接絶縁体に接して封入したものである。このケーブルの特長としてはまず第一にガス圧監視により、ソリッドケーブルの事故の大半を占める鉛被亀裂に起因する絶縁事故を未然に防止できることであり、次に一般の油浸紙絶縁では、温度の変動により内部に低気圧のボイドが発生し、そこでコロナ放電が起こつて絶縁劣化をきたすのに対し、低ガス圧ケーブルでは、ボイド内のガス圧が常にゲージ 1 気圧に保たれているため放電が起こりにくく、多少のボイドが存在してもそれが絶縁上の大きな弱点とならないことである。これに対し OF ケーブルあるいはコンプレッションケーブルはほぼ同様な性質をもっているが、これらを 20~30 kV の系統に使用するとソリッドケーブルに対し相当高価となることはまぬかれないのに反し、低ガス圧ケーブルはソリッドケーブルとほぼ同様な価格であるので、20~30 kV の系統に対し我国においても次第に使用されるようになった。

しかし、この両性能を同時に最高度に期待することは一般には困難なことである。すなわち、ガス圧監視のためには常時ケーブル全長にガス圧がかゝっていることが必要であり、傾斜地等において油の流下が起こりガス通路がふさがれる状態となれば、ガス圧ケーブルの第一

の特長は失われることとなる。したがって、低ガス圧ケーブルでは一度含浸した絶縁油の余剰分を除去することが必要である。ケーブルの製作に当つてはこの脱油工程はもつとむずかしいものの一つである。すなわち、脱油は必要であるがあまりに多く脱油を行なうと絶縁体内にボイドが多くなり、たとえ1気圧のガスが入つていても比較的低い印加電圧下でボイド放電が起こるようになり、はなはだしい場合にはコロナ開始電圧は使用電圧よりも低くなり絶縁上好ましくない結果となる。この相反する要求を満たすためには工場において製作法に関する研究が行なわれ、現在すでにすぐれた性能のケーブルが作られているが、この場合にもコロナ開始電圧は比較的強く使用電圧に接近しているのが普通であり、使用中わずかの異常電圧発生時にもボイド放電が起こりうる状態である。これに対し、このケーブルの発明者G.B. Shanklin<sup>(63)</sup>により自己回復作用と言われる好都合な現象があることが報告されている。すなわち、低ガス圧ケーブルにおいてはソリッドケーブルとは逆に使用中コロナ開始電圧が上昇する傾向がある。これは非常に重要な性質であり、すべての場合にこのような特性を期待できるとすれば低ガス圧ケーブルは非常にすぐれたケーブルであると言いうことができる。しかし、この自己回復作用の機構についての解明は行なわれていなかつたために、本邦においても最初このケーブルを採用するに当つて需要家に若干の不安があるのはまぬかれない状況であつた。このため筆者らはモデルならびに実ケーブルについて実験検討を行ない、自己回復作用の機構を解明し、この作用が実用的に期待できるものであることを確認し、かつその期待できる程度を定量的に明らかにすることができたので、ここにその検討結果を述べる。

## 2. 絶縁油のコロナ放電による劣化特性

### 2.1 目 的

自己回復作用によるコロナ開始電圧の上昇がどのような機構で起こるとしても、低ガス圧ケーブルの製作直後のコロナ開始電圧は低く使用電圧に接近しているため、使用中に多少ともボイド放電が起こることを考えねばならない。特にコロナ開始電圧上昇の速度が小さく、十分な値に達するまでに長時間を要し、その間ボイド放電により絶縁耐力の著しい低下が起こる場合には、コロナ開始電圧が上昇する作用があつても、このケーブルの絶縁性能はすぐれたものということとはできない。したがつて、自己回復作用の検討を行なうにはボイド放電による絶縁劣化を考慮する必要がある。本章は油浸紙絶縁のコロナ劣化の研究の第一段階として、絶縁油のコロナ劣化について検討した結果を述べたものである。

絶縁油の耐コロナ性と言え、通常変圧器油等がコロナ放電を受けた場合に水素ガスを発生、あるいは吸収することを指すことが多い。実際に油入変圧器、OFケーブルならびに油入コンデンサ等ではこの性質が重要であり、これらの機器では油の電気的性質が大きく変化するほどのコロナ放電をうけることは、油浸紙絶縁の破壊を意味することである。したがつて、変圧器油等の低粘度油に対するコロナ劣化の研究においては、劣化の初期のガス発生あるいは吸収に対する検討が主として行なわれているが、電気的性質とコロナ放電との関係を検討した例は少ない。一方ソリッドケーブルの長期間使用したものには、絶縁体中に油の放電による生成物(ワックス)の存在することが古くから知られており、



このワックスは絶縁性能を低下させるものであると考えられていた。<sup>(66)</sup>しかし、その後ワックス自体の電気的性能は悪くないことが知られたが、ソリッドケーブルの製作直後の性能は非常にすぐれており、その状態と比較すればワックスの生じた状態では明らかに絶縁性能は低下しているため、ワックスの絶縁性能に対する影響も評価しがたく、高粘度油のコロナ劣化に関する研究はまともなもののみられなかつた。特に低ガス圧ケーブルではその構造上、ガス発生あるいは吸収は実用上大した問題でなく、電気的性質が問題である。本章には高粘度ケーブル油がコロナ放電をうけた場合の電気的性質の変化を検討した結果について述べている。

従来ソリッドケーブルの含浸油としては、鉱油に増粘度剤としてロジンが多く添加使用されてきたが、合成化学の進歩とともに種々の合成油が得られるようになり、現在では正ブテンならびにイソブテンの重合物である米国製合成油 P O 製品が増粘度剤として使用される場合が多い。低ガス圧ケーブルの含浸油としては通常ソリッドケーブルと同一のものが使用される。これら合成油の特長としては、電気的性質がきわめてすぐれていることであるが、一方コロナ放電をうけた場合には劣化が著しいという報告もあり<sup>(67)</sup>、低ガス圧ケーブルの含浸油として使用することに対しては種々の批判がでている。本研究は実用的に低ガス圧ケーブルに適当な含浸油を決定することをも目的として、各種絶縁油の長期コロナ劣化特性を比較検討したものである。

## 2.2 供試絶縁油

供試絶縁油はX Xヘビーオイル (Sun Oil Co 製) ならびに PO-3000 の単独の絶縁油と, X Xヘビーオイルをベースとして増粘度剤に F Fロジン (30%) ならびに PO-3000 (33.7%) を加えた2種の絶縁混和物との計4種類である。

## 2.3 実験法

### 2.3.1 コロナ放電劣化実験用装置

コロナ放電によつて起こる化学反応は複雑であり, 放電条件により異なつた反応が起こることが多い。<sup>(68)</sup> 特に液体では表面のみならず気相で反応が起こる割合も多いために,<sup>(12)</sup> たとえば放電空間において局部的であつても, 放電エネルギー密度の過大な部分がある場合には実際との等価性が失われることになる。実験装置の具備すべき条件としては, 化学反応が実際のケーブルと同等であることならびに反応速度を加速できることが重要である。実験装置としては種々の形状のものについて検討したが, 本研究において対象とする油は高粘度油であり, コロナ放電をうければ更に粘度が上昇するため複雑な形状の容器を使用することは困難であり, 結局図2.2.1に示すようなガラス製容器<sup>(69)</sup>を使用した。容器内のガス圧は減圧するほど安定な放電が得やすく,<sup>(11)</sup> また後に述べるように化学変化そのものを加速することができる。ガス圧ケーブルでは窒素ガスが封入されており, この窒素ガスは不活性ではあるがコロナ放電が起こつた場合には活性化窒素として油と反応を起こすことも考えられるもので,<sup>(70)</sup> その点もあわせ検討するために, 容器内には窒素

ガスを  $100\text{ mm Hg}$  に封入した。温度は油槽中で  $80^\circ\text{C}$  に保ち、電圧約  $20\text{ kV}$ 、電流約  $3\text{ mA}$  の条件で放電させた。なお試料油はコロナ放電による劣化実験の前に十分脱気を行なっている。

### 2.3.2 放電量の表示法

温度、圧力ならびに放電容器の形状ならびに寸法等の物理的条件を一定にした場合には、化学的变化に関する放電量の積算値は放電電荷量（電流 $\times$ 時間）かあるいはまた放電エネルギーで表わすのが普通である。第1部において検討したように、電流計によつて測定される放電電流中には化学反応に関係のない充電電流ならびに高周波振動電流などが含まれ、回路条件の差異、あるいはまた多くの放電容器を使用する場合には容器個々のわずかの寸法差等により電流値が変動し、単にコロナ劣化の相互比較を行なうのみの場合でも、電流計による電流値で放電量を表わすことは不適當である。したがつて、本実験では放電電力によつて放電量を示すこととし、測定にはシェリングブリッジ (Schöring Bridge) を使用して、電源電圧の基本波に対する放電電力の測定を行なつた。コロナ放電は容器内の気体部分で起こるが、このエネルギーが全部絶縁油の化学変化に関係があるものとして、絶縁油の単位体積当りのエネルギーをとつてコロナ劣化の検討を行なつた。コロナ放電による化学変化のうち、油の表面ならびに放電空間で起こるものの割合は明らかでないが後者がかなり大きいことが知られており、<sup>(12)</sup> この点固体絶縁材料の場合とは逆である。したがつて、放電量の表示法として放

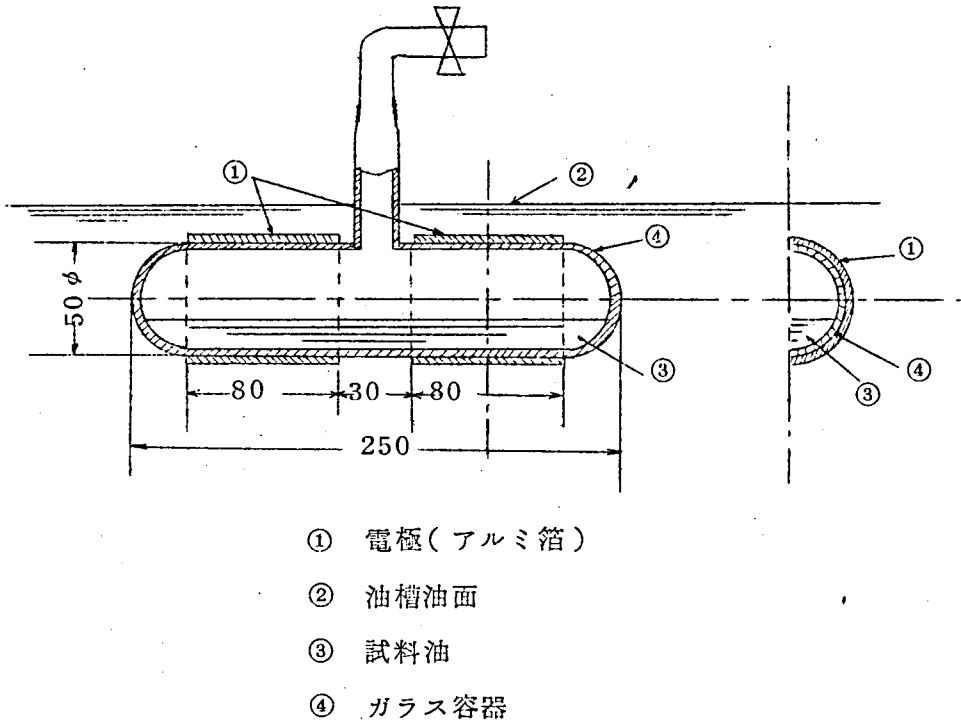


図 2.2.1 絶縁油のコロナ劣化実験用装置

電電力をとることは，固体絶縁材料についての実験の場合に比してより適当な方法である。なお前記条件で  $1 \text{ kWh}/\ell$  のコロナ放電エネルギーを与えるには約3時間を要する。

コロナ放電のエネルギーは全放電空間で消費されるものであり，油量ならびに容器寸法等の条件が変化すれば化学反応速度に変動が生ずる。たとえば圧力が変動した場合の反応速度の変動は，後に示すようにかなり大きい。したがって，油単独についてのコロナ劣化の実験結果とケーブルのボイド中のコロナ

放電による油の変質との対応を求める場合には、コロナ放電の量のみならず、たとえば粘度の変動等の化学変化を直接示す量で比較を示すことが必要である。

### 2.3.3 電源周波数

一般にこの種の実験では第1部において述べたように数百~数千サイクルの周波数の電源が使用されるが、本実験では60%と160%の場合を比較し、同一量のコロナ放電エネルギーを受けた場合に同等な化学変化が起こることを確かめ、反応を加速するために160%の電源を使用した。第1部のように1.5 kc を使用しなかつたのは実験設備上のつごうによるものである。

### 2.3.4 ガス圧力の調整

コロナ放電を受けることによつて油からはガスを発生し圧力が増大するので、1時間ごとにガス圧力を調整し、また8~9 kWh/ℓ ごとに新しい窒素ガスと入れ替えを行なつた。なお放電は1日に8~9時間(約3 kWh/ℓ)行ない、累積したものである。

## 2.4 実験による考察

### 2.4.1 コロナ放電による電氣的性質ならびに粘度の変化

図2.2.2ならびに図2.2.3にはコロナ放電により劣化した油の誘電正接ならびに誘電率の温度特性を示した。XXヘビーオイルならびにPO-3000 単独の場合には、図2.2.3と類似の特性である。このような特性を示す原因は次のように考えられる。すなわち、ロジン配合の混合物はロジンのために劣

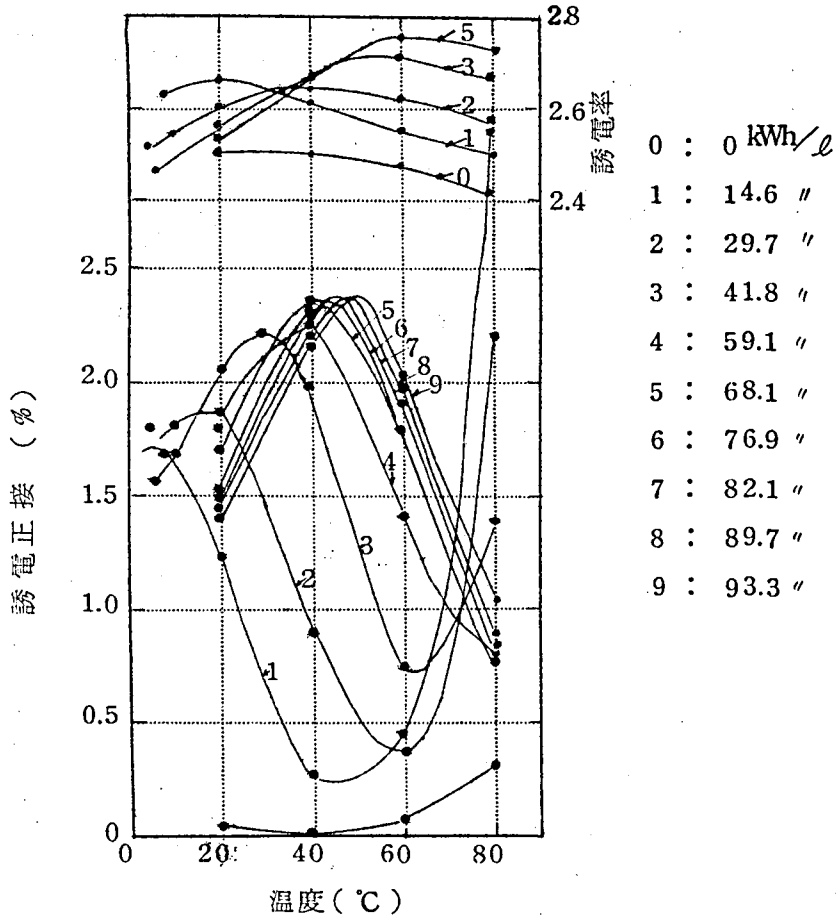


図 2.2.2 コロナ劣化油の誘電正接の温度特性  
(XXヘビーオイル+FFロジン)

化の前から有極性であり、さらにコロナ放電によつて急激に自由基等有極性分子が増加し、双極子による誘電損失が増加するが、一方粘度増大に伴なつて誘電損失の増加は押えられ、かつまた誘電正接の極大値を示す温度が高温部に移動しているものと考えられる。これに対しPO-3000配合の混和物は最

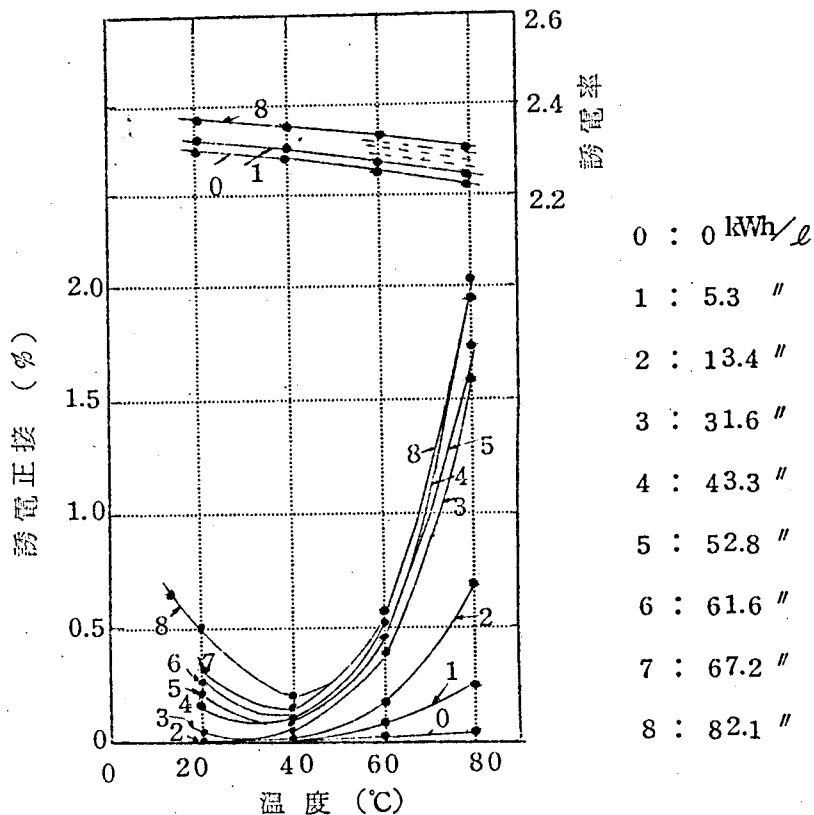


図 2.2.3 コロナ劣化油の誘電正接の温度特性  
(XXヘビーオイル+ PO-3000)

初無極性に近いが，放電によつて極性が現われ，低温部の誘電正接が上昇している。しかしその進行速度は前者に比しておそい。

図2.2.4～図2.2.7にコロナ放電により劣化した油の各温度における誘電正接とエネルギーとの関係を示した。これらについて，まず変化の速いロジン配合の混和物を例にとつて考えると，80℃の誘電正接が極大値を経てふたたび減少している

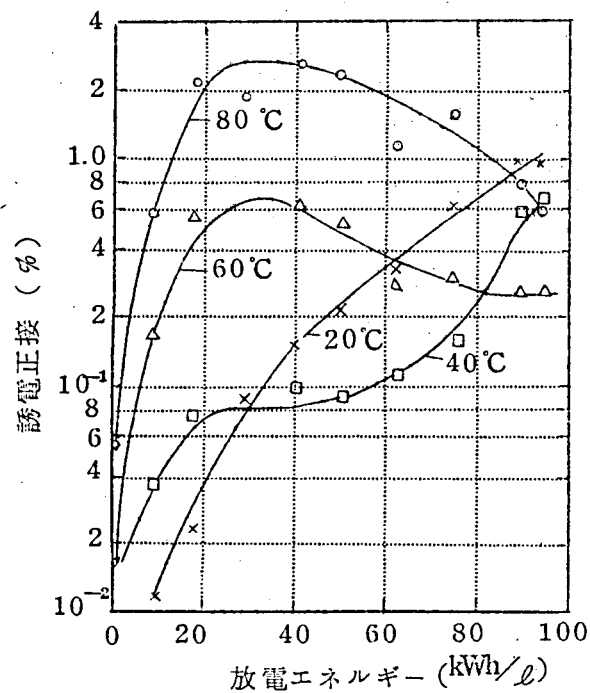


図 2.2.4 絶縁油のコロナ放電による誘電正接の変動  
(XXヘビーオイル)

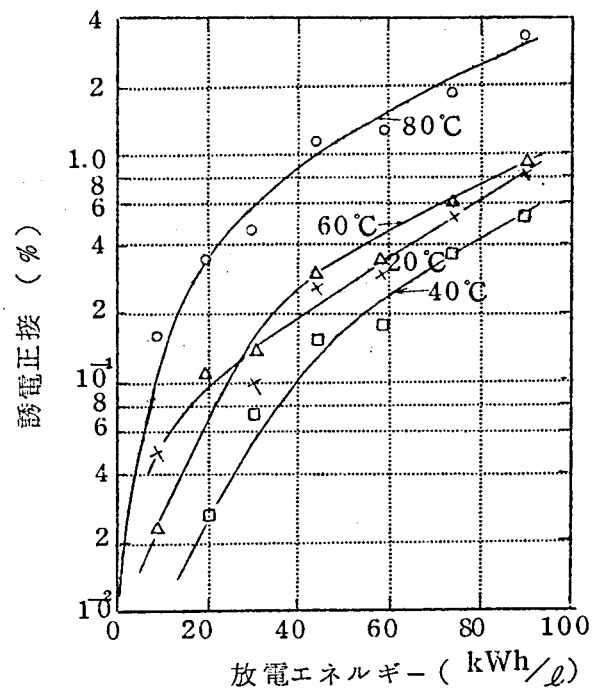


図 2.2.5 絶縁油のコロナ放電による誘電  
正接の変動 (PO-3000)



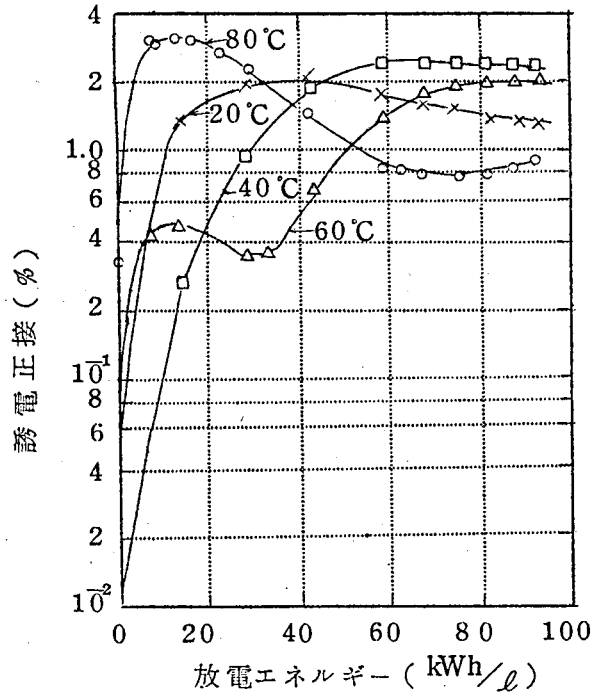


図 2.2.6 絶縁油のコロナ放電による  
誘電正接の変動  
(XXヘビーオイル+FFロジン)

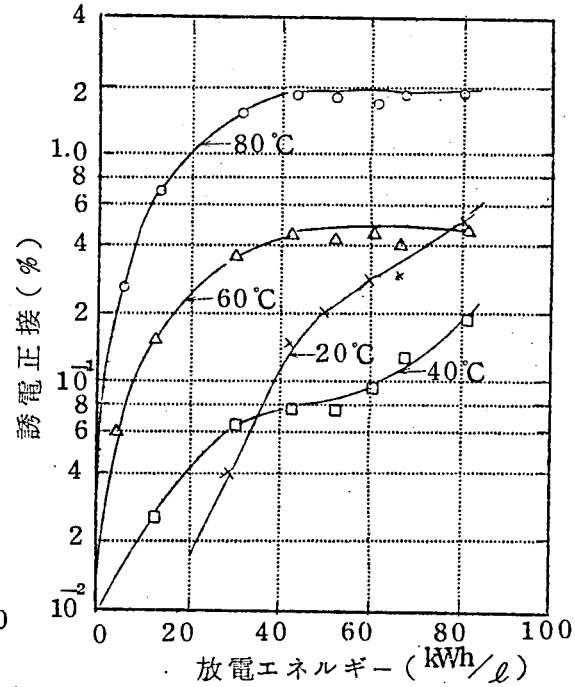


図 2.2.7 絶縁油のコロナ放電による誘電正接  
の変動  
(XXヘビーオイル+PO-3000)

が、これはこの温度における誘電損失の原因が主としてイオン伝導に基づくものであり、放電により励起された分子あるいはイオン化された分子は増加するが、放電によつて生成された自由基同志の結合反応ならびに重合反応による粘度の増大が急なため、イオンの移動度が減少し、かえつて導電率の減少が起るためである。<sup>(7)</sup> 60℃ の値が同様な理由で低下しふたたび上昇しているのは、この程度の放電が起るとイオンの増加とともに極性分子の増加が顕著となり、双極子に基づく誘電損失が大きくなるためである。これを図2.2.2の温度特性からみれば、この温度が誘電正接の最小点の低温側になつたことに対応している。20℃ならびに40℃の誘電損失の原因の大部分は最初から極性分子によるものであつて、20℃の値が最大値を経て減少していることは粘度の増大が著しく固体の状態に近づいていることを示している。他の3試料についても同様な変化傾向と考えられるが、変化の速度に大きな差異が存在する。たゞしPO-3000 単独の場合には、後に述べるように粘度の上昇がほとんど起こらないので、異なつた傾向の特性となつてゐる。PO-3000 配合の混和物では、各成分の単独の場合の特性変化を加算したような特性を示し、両者の組合せによる特殊な現象は現われていない。ロジン配合の混和物の急激な特性の変化はロジン自体の重合反応によるところが大きいと考えられる。

コロナ放電による誘電正接の極大値ならびに極大値を示す温度の推移については、変化の急なロジン配合の混和物の特性を

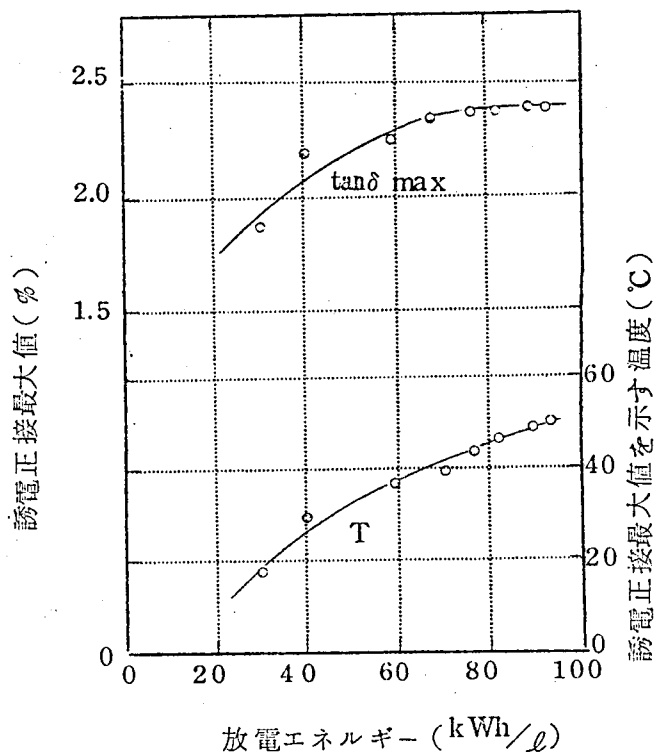


図 2.2.8 コロナ劣化油の誘電正接最大値ならびに最大値を示す温度の推移 (XXヘビーオイル+FFロジン)

示すと図2.2.8のようになり，飽和の傾向が認められ，粘度その他の特性の変化などを総合して，コロナ放電による劣化反応には一つの終点とも見られる状態が存在するものと考えられる。すなわち，この状態では固体の状態に近いので，コロナ放電によっても油の流動は起こらず，したがってコロナ放電の影響は表面のみが受け，内部の材質的变化は起こらなくなるものである。この状態となつてからのコロナ放電による変化は固体絶縁材料

の場合と同様に表面からの気化消耗ならびに局部的な侵食孔の進展が起こり、ついには絶縁破壊に至るものである。PO-3000 配合の混和物については特性変化がおそいために誘電正接の極大値を示す温度が測定温度範囲までできていないが、変化の傾向より同様な特性が期待される。

図2.2.9 ~ 図2.2.12 にはコロナ放電による直流および交流に対する固有抵抗の変動を示した。誘電損失が主としてイオンの導電に基づく場合には交直流両固有抵抗がほぼ一致するが、双極子による損失が顕著になると両者に大きな差異が生じてくる、図2.2.13 ならびに図2.2.14 には真空中でコロナ放電を受けた場合の固有抵抗の変動を示した。真空中のコロナ放電により劣化する場合は反応速度がはるかに大きい、変動の傾向は窒素ガス100mmHg の場合と同様である。したがって窒素が活性化して油と反応を起こしたとしても電気特性に関しては大きな影響をうけないと考えられる。

図2.2.15 に粘度の変動を示した。ロジン配合の混和物ではロジンが放電により急速に重合するので<sup>(72)</sup>粘度の増大が急である。これに対しPO-3000 の配合のものではPO-3000 の粘度がほとんど上昇しないので粘度の変動は緩慢となつてゐる。一般に放射線の照射を受けた場合に重合が起こるものと分解が起こるものとがあるが、PO-3000 は後者に属し、放電をうけても大きな分子に重合し得ないものである。

図2.2.16 には真空中で放電を受けた場合の粘度の変動を示した。

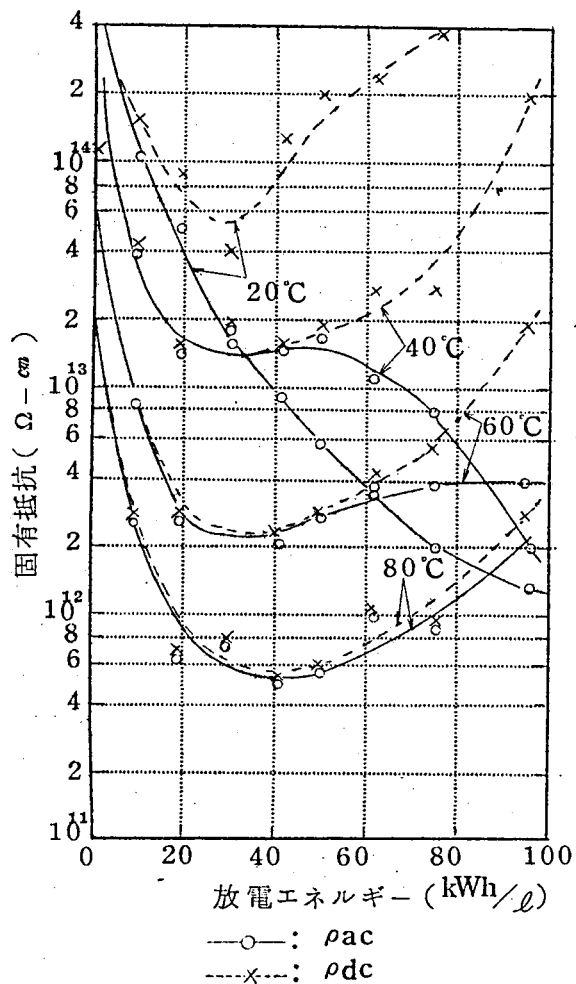


図 2.2.9 絶縁油のコロナ放電による固有抵抗の変動  
(XXヘビーオイル)

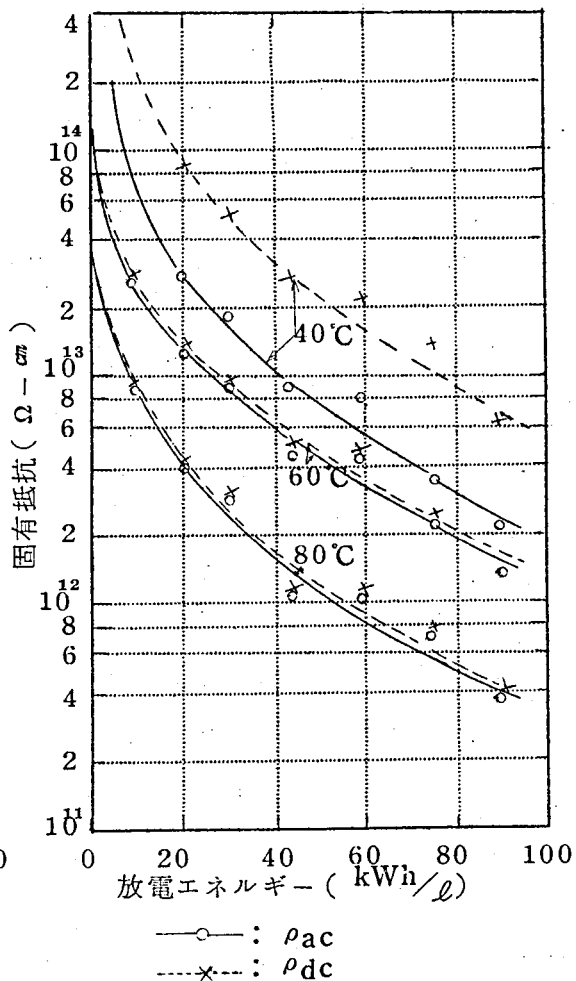
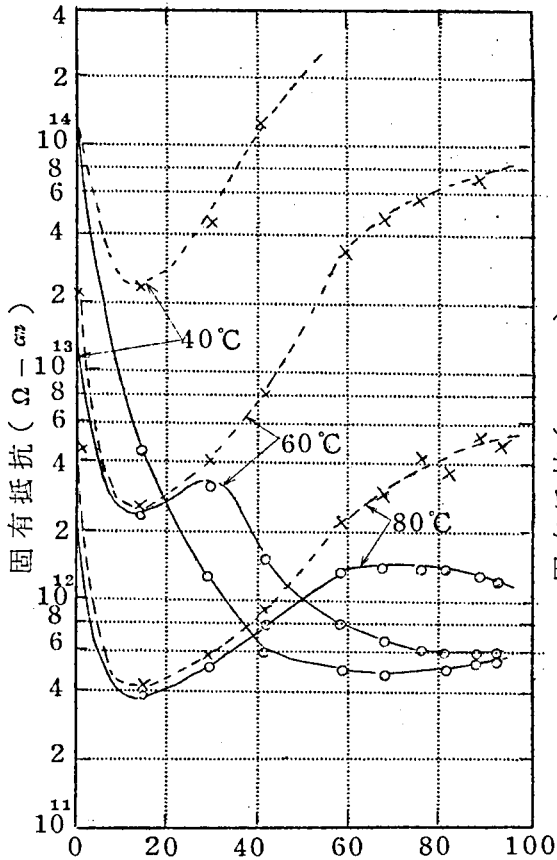


図 2.2.10 絶縁油のコロナ放電による固有抵抗の変動  
(PO-3000)



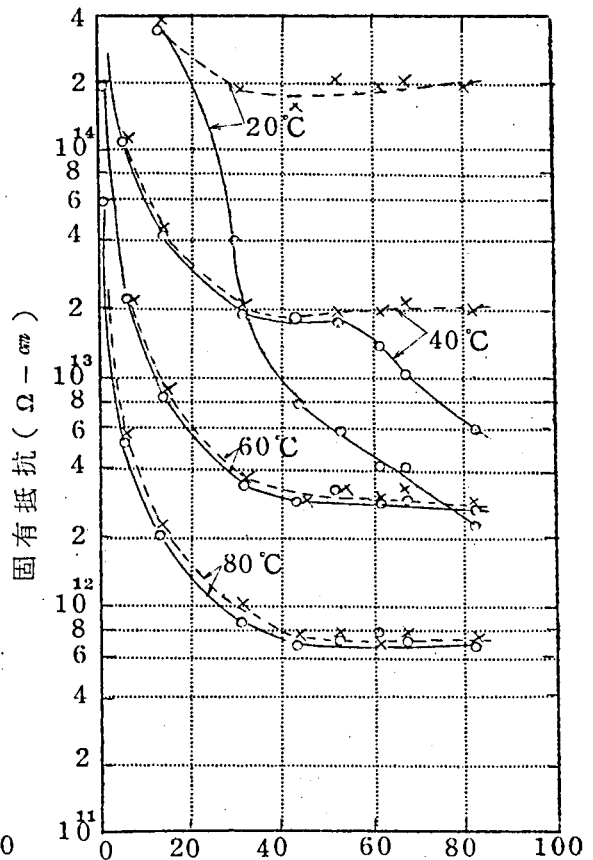
放電エネルギー ( $\text{kWh/l}$ )

—○— :  $\rho_{ac}$

---×--- :  $\rho_{dc}$

図2.2.11 絶縁油のコロナ放電による固有抵抗の変動

(XXヘビーオイル+FFロジン)



放電エネルギー ( $\text{kWh/l}$ )

—○— :  $\rho_{ac}$

---×--- :  $\rho_{dc}$

図2.2.12 コロナ放電による固有抵抗の変動

(XXヘビーオイル+PO3000)

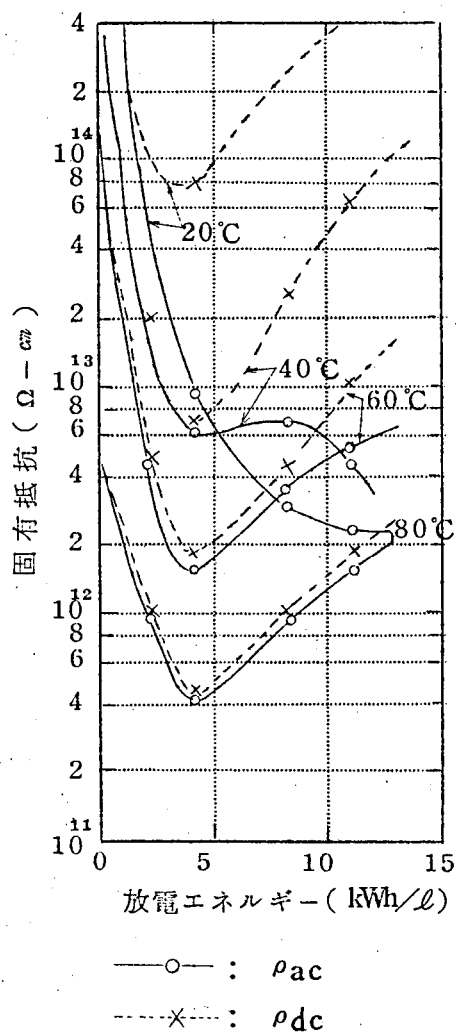


図 2.2.14 絶縁油の真空中のコロ  
ナ放電による固有抵抗  
の変動

(XXヘビーオイル+ PO-3000)

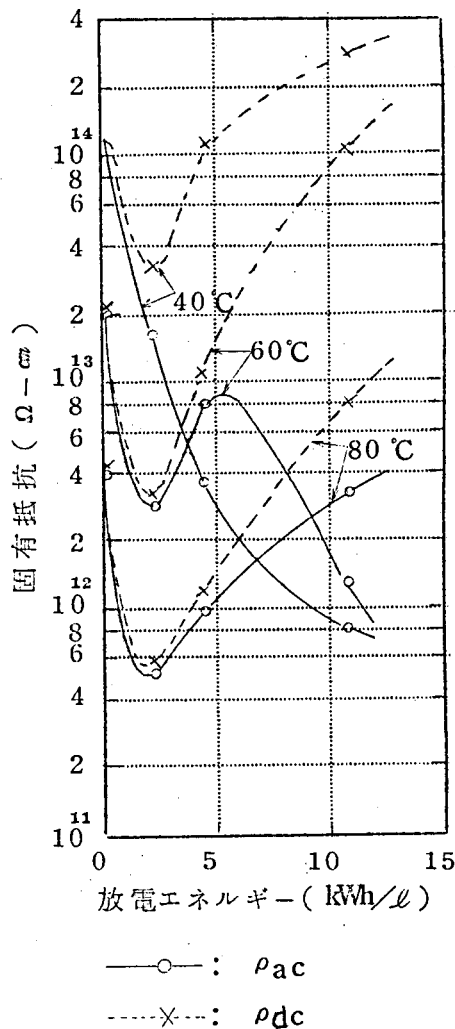


図 2.2.13 絶縁油の真空中のコロ  
ナ放電による固有抵抗の変動

(XXヘビーオイル+ FFロジン)

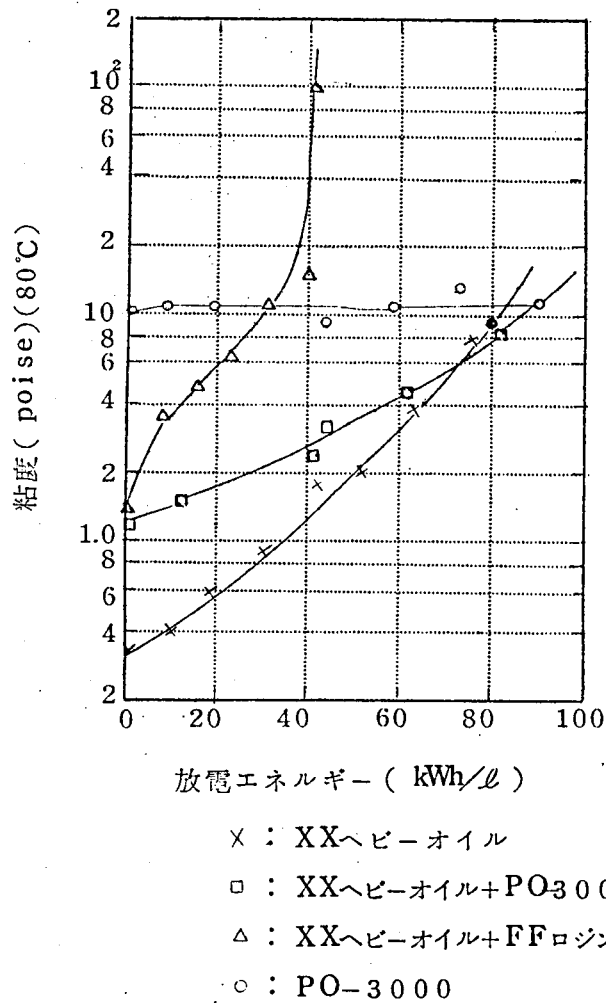


図 2.2.15 絶縁油の窒素ガス100mmHg 中のコロナ放電による  
粘度の変動

図2.2.17ならびに図2.2.18に窒素ガス100mmHg 中と真  
空中との放電を受けた場合のイオン濃度の変動を示した。こ  
れはイオンの大きさを一定と仮定し、粘度と導電率とから求め



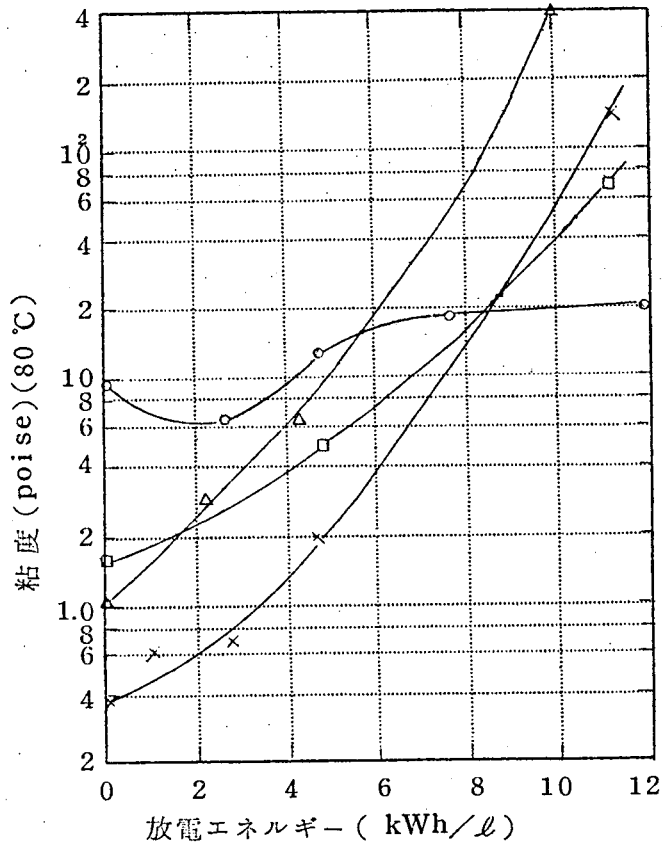
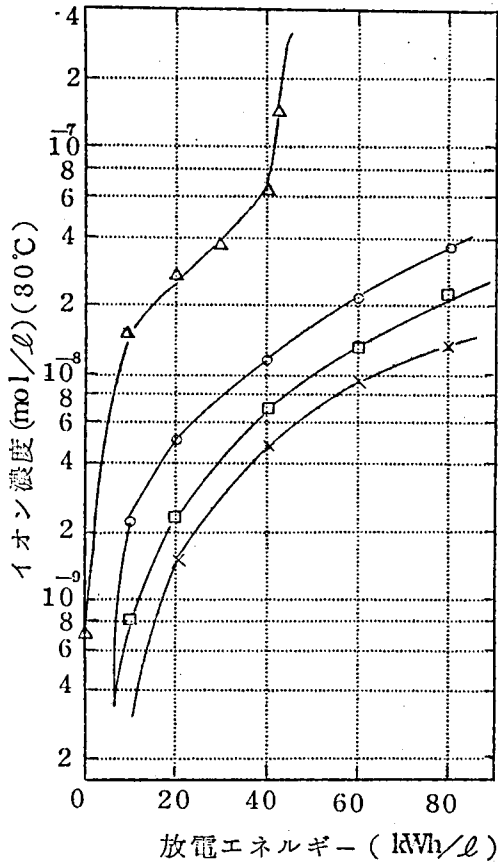
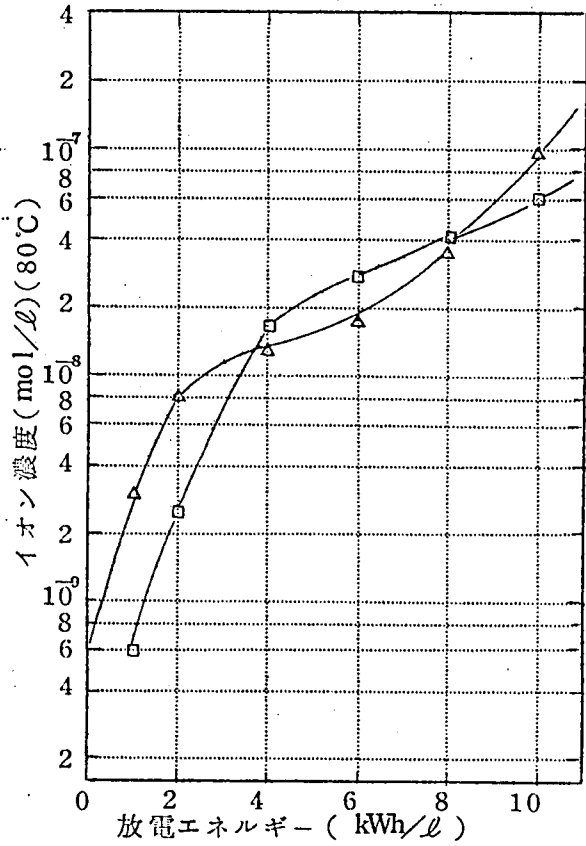


図 2.2.16 絶縁油の真空中のコロナ放電による  
粘度の変動



- x : XXヘビーオイル  
 □ : XXヘビーオイル+PO-3000  
 ○ : PO-3000  
 △ : XXヘビーオイル+FFロジン

図 2.2.17 絶縁油の窒素ガス 100 mmHg  
中のコロナ放電によるイオ  
ン濃度の変動



- : XXヘビーオイル+PO3000  
 △ : XXヘビーオイル+FFロジン

図 2.2.18 絶縁油の真空中のコロナ  
放電によるイオン濃度の  
変動

たものである。表2.2.1には窒素ガス100mmHg中ならびに真空中で放電をうけた場合の速度の比較結果を示した。これによると絶縁油のコロナ劣化反応は低気圧ほど加速されるが、その加速の程度は絶縁油の種類によつて異なることがわかる。また窒素の影響はほとんど表われていない。

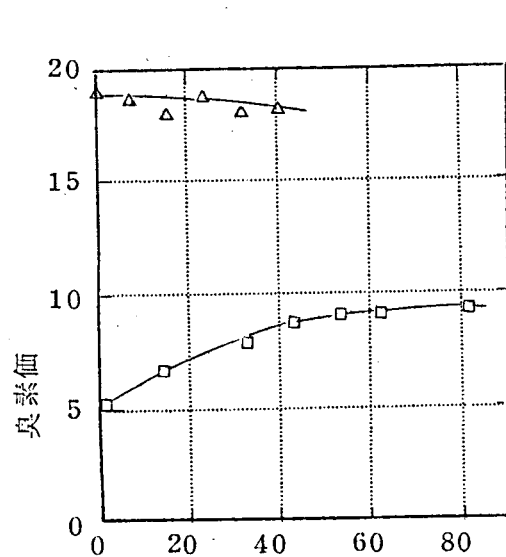
#### 2.4.2 不飽和度の変動

図2.2.19にコロナ放電により劣化した油の臭素価の変動を示した。石油系炭化水素のコロナ放電による生成物は不飽和炭化水素の重合体であることが知られている<sup>(7)(73)</sup>。PO-3000配合の混和物の臭素価が増加した後に飽和の傾向を示しているのは、不飽和重合物が水素添加反応に転じたためと考えられる<sup>(73)</sup>。

ロジン配合の混和物ではロジンの不飽和のために臭素価はかなり大きい、コロナ放電により増大せずむしろ減少する傾向を示すのは、ロジンの二重結合が飽和されるためと考えられる。

表 2.2.1 窒素ガス100mmHg中ならびに真空中のコロナ放電による絶縁油の劣化の比較

劣化条件 性質 比較条件	N <sub>2</sub> , 100 mmHg		真空(約 1 mmHg)	
	XXヘビーオイル +FFロジン	XXヘビーオイル +PO-3000	XXヘビーオイル +FFロジン	XXヘビーオイル +PO-3000
粘度が10 poise に変動するまでの 放電エネルギー(kWh/l)	3.1	8.8	4.5	6.4
10 poiseのときの イオン濃度( $\frac{mol}{l}$ ) (80°C)	$4.2 \times 10^{-8}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$1.4 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$
粘度変動よりの反応 速度比真空100mmHg)	6.7	13.8	—	—

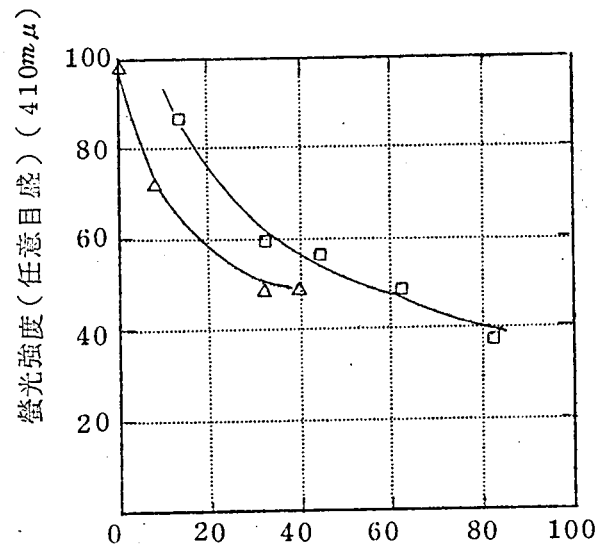


放電エネルギー ( kWh/ℓ )

□ : XXヘビーオイル+PO-3000

△ : XXヘビーオイル+FFロジン

図 2.2.19 絶縁油のコロナ放電による臭素価の変動



放電エネルギー ( kWh/ℓ )

□ : XXヘビーオイル+PO-3000

△ : XXヘビーオイル+FFロジン

図 2.2.20 絶縁油のコロナ放電による蛍光強度の変動

#### 2.4.3 コロナ放電劣化による色相の変化

絶縁油はコロナ放電を受けると、黄色、赤色、赤褐色ならびに黒色と順次色が変化する。この変化の様子を絶縁油の発する蛍光強度を測定して比較してみた。各油について蛍光強度のスペクトルはそれぞれ異なるが、取扱った2種の混和物では  $410m\mu$  のところに蛍光強度の最大値があるので、この値の変動を示すと図2.2.20のようになる。ロジン配合の混和物は蛍光強度の減少状態から色相の変化がはげしいことが示される。

#### 2.4.4 ガス発生

ガスの発生ならびに吸収は本研究においては特に研究の対象としていないために長時間の変化は求めなかつたが、短時間の場合についての一例を図2.2.21に示した。実験はガス圧が

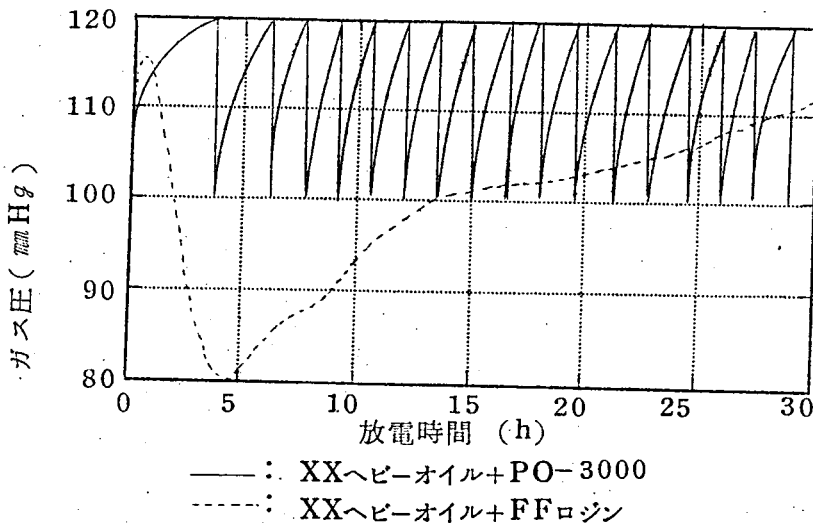


図 2.2.2 1 絶縁油のコロナ放電によるガス発生状況

注) XXヘビーオイル+PO3000 の場合にはガス圧が  $120mmHg$  に達する度に  $100mmHg$  まで下げる。

120mmHgに達すると100mmHgにもどし、放電を続けたものである。ロジン配合のものは最初ガス圧の低下が起こっており、このことはロジンの2重結合が単に油の分解によつて発生する水素を吸収するのみならず、窒素ガスをも化学反応により吸収することを示している。しかし、すでに述べたように電気特性には窒素ガスの影響は現われず、またガスの発生吸収は低ガス圧ケーブルにおいてはたゞちに性能には関係なく、これらの特性は実用的な意味は特にないものと考えられる。

次に発生ガスをマススペクトルによつて分析した結果を表2.2.2に示した。試料ガスは図2.2.2 1の特性を求めた場合と同じく、発生ガスにより容気内圧力が120mmHgまで上昇すると発生ガスを外部に取り出して100mmHgまで下げ、これをくり返す方法により、各試料油について同量のガス(油100ccに対し約200cc(N.T.P.)のガス)が発生するまで放電を続けて得たものである。したがつて、ロジン配合の混和物よりの発生ガスは他のものに比して長時間の放電を行なつて求めたものである。ガス分析を行なうに当つては、質量分析器におけるパターン系数を求める等のことを行なっていないので、分析結果は定性的なものである。分析結果をみると、ロジン配合の混和物より発生するガス中には、炭酸ガスならびに一酸化炭素の多いのが若干目だつた特徴である。ガス成分として酸素の存在するものはガス捕集時の空気のもれがあつたためと考えられる。しかし、いずれの場合についても発生ガスの大部分は水素であり、これらの結果は油入遮断器において油中アーク発生の際発生するガ

表 2.2.2 コロナ放電によつて絶縁油より発生するガスの分析結果

(%)

試料 実験条件 成分	XXヘビーオイル +FFロジン (33.7%)	XXヘビーオイル +PO-3000 (30%)	XXヘビーオイル	PO-3000	XXヘビーオイル+ FFロジン (33.7%)	XXヘビーオイル +PO-3000 (30%)
	窒素ガス 100mmHg	窒素ガス 100mmHg	真 空	真 空	真 空	真 空
H <sub>2</sub>	60.0	69.4	78.0	60.6	62.0	63.0
H <sub>2</sub> O	2.2	2.2	0.6	0.4	0.2	0.3
N <sub>2</sub> or CO	18.6	9.2	0.4	0.0	17.0	8.4
O <sub>2</sub>	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
CO <sub>2</sub>	3.2	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0
C <sub>1</sub> -群	11.5	14.0	13.0	11.0	11.0	12.0
C <sub>2</sub> -群	2.0	4.6	6.0	20.0	5.0	11.0
C <sub>3</sub> -群	0.5	0.6	1.0	6.0	0.7	3.0
C <sub>4</sub> -群	0.0	0.0	1.0	2.0	0.1	0.3

注： 100 cc の試料油より 200 cc(N.T.P.) のガスが発生するまで放電させたものである。

37

スとほとんど等しいものである。ガス分析のみでは実用的性能は明らかにされないが、これらの結果から判明したことは、PO-3000 とXXヘビーオイルとを混合した混和物よりの発生ガスは、個々の成分よりの発生ガスを加えたものとほぼ等しく、電気特性において組合せによる特殊現象の起こらないことをガス分析の結果よりも確かめ得たことである。

#### 2.4.5. 絶縁耐力の変動

絶縁耐力は絶縁材料としては実用的にもつとも重要な性質であるが、こゝで取扱った油は高粘度油であるため、コロナ放電をうける前の状態でも厳密な破壊電圧の測定を行なうことは困難である上、コロナ放電をうけることによつては粘度が上昇し、液体と固体との中間の形態となり測定はいつそう困難である。したがつて、絶縁耐力に関する実用的な性能の検討としては油浸紙について行なうこととし、油自体について破壊電圧の系統的な測定は行なわなかつたが、定性的な参考実験としてロジン配合ならびにPO-3000 配合の混和物につき、窒素ガス 100 mmHg 中で約 4.0 kWh/l の放電をうけたものについて、図2.2.2 2 に示す装置により破壊電圧の測定を行なつた。すなわち、図2.2.2 2.のガラス製容器に試料約 20 cc を入れ、80 °C 中で真空脱気を行ない、常温において容器自体を油中に入れて破壊電圧を求めた。結果はばらつきが非常に多く、また実験数も各試料数回のみであるため相互の比較は困難であるが、劣化後の破壊電圧 は 0.5 mm 間隔に対し 2 kV/sec の電圧上昇率で 50 kV 以上に達するときもあり、劣化前よりむしろ大きな



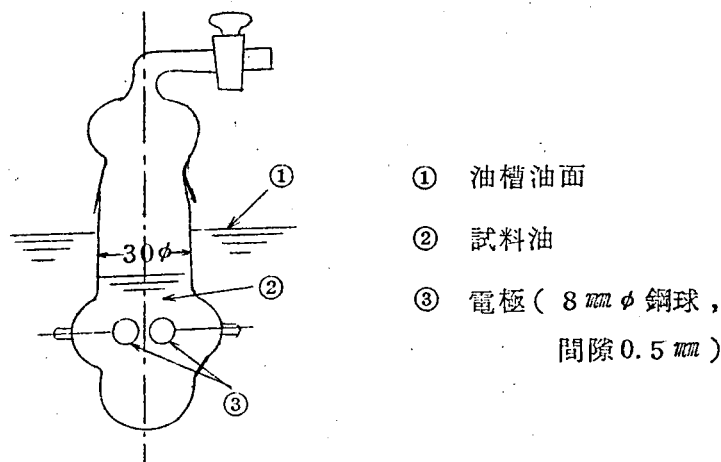


図 2.2.22 高粘度油の破壊電圧測定用電極装置

値である。

今回のコロナ劣化の実験では、油の分解ならびに重合等の化学反応が進むに従つて器壁に反応生成物のワックスが付着し、この部分では反応の進行も速くなつてゐる。したがつて容器外に取り出した場合には異なつた反応進行程度のものが混合した不均質なものとなり、このことも破壊電圧測定値にばらつきを与える大きな原因であると考えられる。しかし、いずれにしても、絶縁油が窒素中ならびに真空中でコロナ放電をうけてワックス状となつても、その材質の絶縁耐力は低下しないと考えることができる。

## 2.5 総括

以上絶縁油のコロナ放電をうけた場合の変化の概要を述べたが、こゝで得られた結果を実際のケーブルに結びつけるためにはさらに

種々の検討が必要であり、それらについては後章に述べる。

しかし、以上の実験結果より定性的に明らかとなつたことは、絶縁油の長時間のコロナ劣化による誘電正接の増大は急速なものでなく、その増大には終点ともみられる状態が存在し、ケーブルの使用で、長年月の間に絶縁体の一部にそのようなコロナ劣化の進んだ劣化生成物ができて、それがたゞちにケーブルを熱的不安定に導くほど大きな誘電損失を伴うものでなく、また破壊電圧を低下させるものでもないことである。実際の低ガス圧ケーブルではゲージ1気圧の窒素ガスが封入されており、放電が抑制されていると同時に、放電が起こつたとしても化学反応の速度は小さいことが推定される。次に窒素ガスについては放電による活性化窒素は真空に近い場合に生じやすいことも考えあわすと、多量の窒素化合物が生ずる可能性は少なく、絶縁油の化学反応は電氣的性質に関する限り、実用的には無視できるものと考えられる。またPO-3000などの合成油も単独で含浸油として使用する場合は別として、増粘度剤として使用する場合には悪い結果を示していない。低ガス圧ケーブルの自己回復作用の起こる速度については後に述べるが、一般にここに示した絶縁油の劣化特性のごく初期の段階に相当する量の放電により、ケーブルのコロナ開始電圧のかなりの上昇が認められるので、ケーブル使用中にうけるコロナ放電の量は、製作時の誘電正接特性から推定される放電量より著しく小さいものである。この意味ではPO-3000配合の混和物はロジン配合のものよりも初期特性がすぐれていることより、ケーブルの含浸油として適当なものと言うことができる。たゞし、ロジンの更に精製度の進んだ電氣特性のす

ぐれたものが得られれば、そのものが増粘度剤として、よりいつそうすぐれているとも考えられるが、後に示すようにPO-3000配合の混和物を使用し十分満足な性能を示す低ガス圧ケーブルが得られており、実用的にはPO-3000配合の混和物が現段階において適当なものであると考えることができる。

一般に低ガス圧ケーブルの含浸油として具備すべき条件としては、ケーブルの使用中にコロナ開始電圧の上昇の起こりやすい粘度であり、コロナ放電その他によつて油が移動する間は電氣的性能の低下ができるだけ小さく、コロナ開始電圧が上昇したような油の分布になつたときは、それまでにうけたコロナ放電によつて粘度は上昇し、その後は温度の変動その他の原因でこの好ましい油の分布状態に変化を生じないと言つたようなものが考えられ、現行の低ガス圧ケーブルでは一応この条件は満足されているものと考えられる。

### 3. 低圧ならびに常圧ガスのモデルボイドならびにモデルケーブルによる自己回復作用の定性的検討<sup>(74)</sup>

#### 3.1 目 的

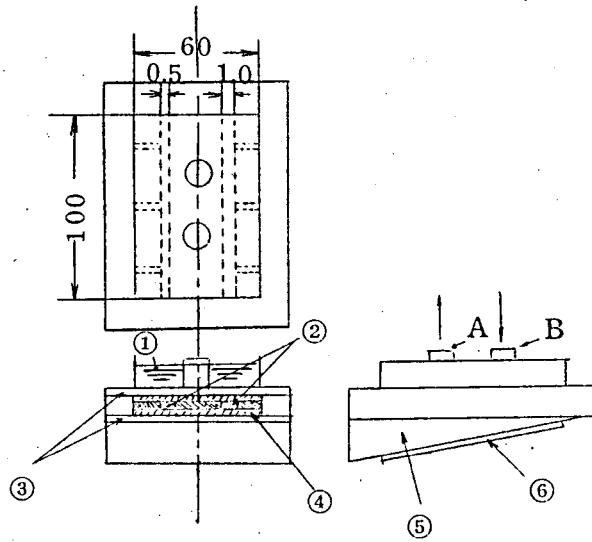
低ガス圧ケーブルの自己回復作用は非常に複雑な現象であるが、こゝではその機構を解明するためのもつとも直接的方法として、ボイド状態の変化を直接目で見るような実験を行ない、ボイドが次第に安定化してゆくことを確認することができ、また自己回復作用に及ぼすケーブル構造上の諸要因、すなわちケーブルの含浸油の種類、紙巻条件ならびに印加電圧等の影響を検討するためにモデルケーブルによる実験を行ない、定性的ではあるがその機構を

明らかにすることができたので、その大要を述べる。

### 3.2 実験法

#### 3.2.1 モデルボイドによる実験法

図2.3.1に示すような実験装置を使用した。すなわち3枚の紙を重ねガラス板の間に封入し、中央の紙に細隙を作りこれをボイドとしたものである。油浸紙中のボイドの状態は単に幾何学的寸法のみならず、油浸率が大きく影響を与えるため、この実験では装置を組み立てた後に真空乾燥を行ない、一定量の油を注射器によつてBより注入し、一定油浸率の試料を作製した。ボイドが周囲から孤立していると、ボイド内のガス圧力は発生ガスにより若干上昇してボイド放電が一時停止し、ガスが拡散することにより圧力が低下するとふたたび放電が起こる等のことがあるので、本実験においてはボイドはすべて連結した状態とし、そのガス圧力はA部において測定する構造とした。ケーブルでは半径方向に電界強度が変動するので、これを模擬するためには図に示すようにポリエステル樹脂板をセル下面に接着し、電極間距離を連続的に変動させる方法をとつた。上部電極には水を使用し、この装置を暗所におきボイド放電の状況を外部より観察できる構造としている。ガス圧は窒素ガス100mmHgとしたが、これは前章の場合と同じく放電を起こりやすくし、かつ化学変化を加速させるためである。さらにまたこの場合には試料とガスとの密着をよくするためにも、ガス圧を常圧以下にすることが必要であつた。実験時の温度は常温であり、印



- ① 電極（水）
- ② ボイド
- ③ ガラス板
- ④ 油浸紙
- ⑤ ポリエステル樹脂
- ⑥ 電極

A：真空引き孔

B：油注入孔

図 2.3.1 自己回復作用検討用モデルボイド装置

加電圧は160%の電源を使用した。

### 3.2.2 モデルケーブルによる実験法

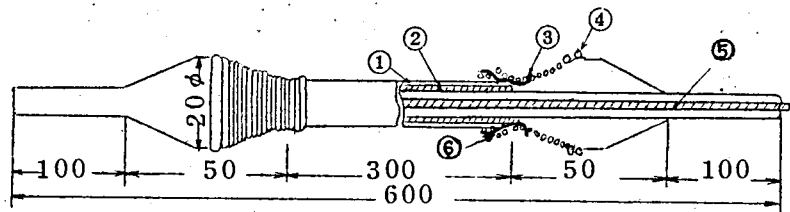
実験に使用したケーブルは導体断面積 $22\text{mm}^2$ ，絶縁厚さ $3\text{mm}$ ，長さ $600\text{mm}$ のものであり，これに乾燥ならびに含浸を行ない，さらに余剰油を除去した後ガラス容器に入れ，窒素ガスを常圧に封入し， $40^\circ\text{C}$ の油槽中で電圧を印加した。

試料は約60°の傾斜で立てた状態とし、電圧印加は1日に約10時間ずつ行ないこれを累積した。この状態で50~100時間おきに誘電正接-電圧特性を測定し、絶縁特性の変化を検討した。試料が小さく測定には誤差が入りやすいので、試料の製作時には補強絶縁ならびに電極構成等に細心の注意を払い、図2.3.2に示すような構造とした。また油浸率は実際のケーブルよりかなり少なくし、端末部より油が電極下に流入する影響を少なくしている。

試料の製作条件としては、紙厚を0.125mm ならびに0.100mm の2種とし、紙巻き方式をバットラップ (Butt lap) (突き合せ間隙0~0.3 mm) とネガティブラップ Negative lap) (突き合せ間隙約1 mm) との2種とし、含浸油は表2.3.1に示す4種のものを使用した。また印加電圧は絶縁最外層にあるボイドまで放電する電圧として8 kVを選び、電源周波数は160% と60%との2種とし、これに全然電圧を印加しないものを加え計3種とし、合計48の条件について実験を行なった。なお予備実験としては類似の構造で、導体断面積100mm<sup>2</sup>、絶縁厚1 mm、長さ300 mmのものについて同様な方法で実験を行なった。

表 2.3.1 モデルケーブルの含浸油

No	含浸油	粘度(セーボルト秒. 100℃)
1	XXヘビーオイル	92
2	XXヘビーオイル+FFロジン(30%)	177
3	XXヘビーオイル+PO3000(40%)	350
4	PO-1000	1230



- ① 主電極(銅テープ)
- ② " (カーボン紙)
- ③ ガード電極(銅線  $0.4\text{mm}\phi$ )
- ④ " ( "  $0.8\text{mm}$  )
- ⑤ 対電極(導体)
- ⑥ 紙(  $0.025\text{mm}$  厚, 主電極, ガード電極間の絶縁用)

図 2.3.2 自己回復作用検討用モデルケーブル

### 3.3 実験による考察

#### 3.3.1 モデルボイドによる実験

G. B. Shanklin は高電界部のボイドへは油が流入することを述べているので<sup>(63)</sup>、この点を実際に確認するため、まずモデルボイド装置において油浸率を多くしたもの(約35%)についてボイド状態の変化を検討した。この場合にはボイドで放電が起ると図2.3.3に示すように油はボイドの周辺からきわめて微細な泡状となつて流入し、やがて全ボイドが油で充満され放電が停止することが確認された。このような油の移動はボイドで放電が起らないような電圧を印加してもほとんど起こらず、たとえ起るとしてもその速度は比較にならないほど小さいものである。したがってボイドに

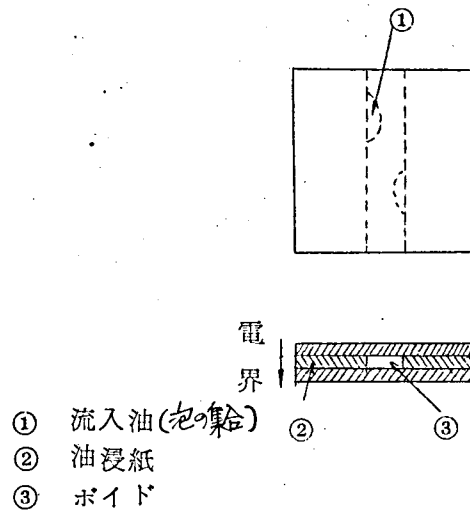


図 2.3.3 ボイド放電による油の移動状態

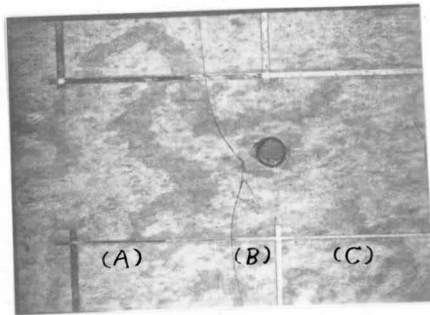
油が流入するためにはボイドで放電が起こっていることが必要である。もちろん実際の場合には温度の変動による油の移動が起こり、これと印加電圧による静電気力との合成作用が存在することは当然考えられることであるが、その点については後章に検討結果を述べる。また本実験ではボイド内の圧力が低いので、ボイド放電が起こらない状態で高電界を印加することができず、電界単独の影響も定量的には明確でないが、定性的には油のボイド内への移動の主原因はボイド放電によるものであることは確かである。ここでボイド放電が起こるとボイドに油が流入することの機構としては次のように考えられる。すなわち、ボイドで放電が起こると電界は歪み、局部的にはかなりの高電界が発生し、しかもその電界は印加電界と直角な成分が大きく、油の流入が起こるのに有効な静



電氣力が生ずる。一方油は表面でコロナ放電をうけるとい  
わゆる泡立ち現象を起こし微細な泡状となるため、この部分<sup>(65073)</sup>  
の見かけの粘度は著しく減少し、静電氣力の影響をうけやす  
くなつてボイド内への流入が起こるものである。次にまた、  
この実験では定量的に明確にされていないが、油が放電をう  
けて化学変化を起こす場合には、量的にかなりの部分が気相  
として化学反応を起こし、重合してふたたび液相ならびに固相とな  
ることはすでに知られたことである。<sup>(12)</sup> これについては第1  
部で述べた固体絶縁材料のコロナ劣化の実験において、容  
器のパッキング等に付着した油の蒸気が放電部の周辺へ  
ワックスとなつて付着することを経験しており、また前章に  
述べた油単独のコロナ劣化の実験においても、長時間の放電  
により容器の内面全体がワックスでおおわれることを確かめ  
ている。したがつて、油浸紙中のボイド放電の場合にも、こ  
のような経過をたどつてボイド内にワックスが集積する量も  
多いものと考えられる。

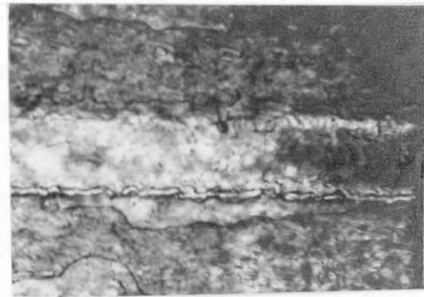
油浸率がケーブルの値とおおよそ等しい30%の場合には、  
もちろん上記の実験のように急速な油の流入は起こらないが、  
長時間のうちには図2.3.4に示すようにボイド内にはワック  
ス化した油が充満し、放電が停止するに至ることを確認する  
ことができた。図において高電界部は図2.3.1の電極間隙  
の近い方に対応している。

以上は定性的な実験ではあるが、ボイド内の変化の経過を  
直接観察することにより、自己回復作用の機構がかなり明確に



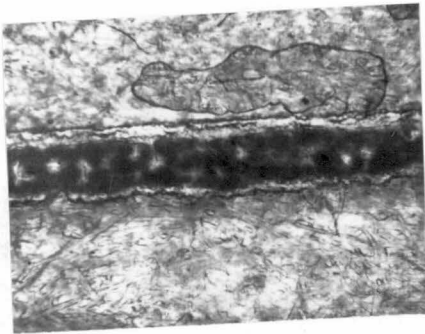
高電界部

低電界部 ( $\times 0.6$ )

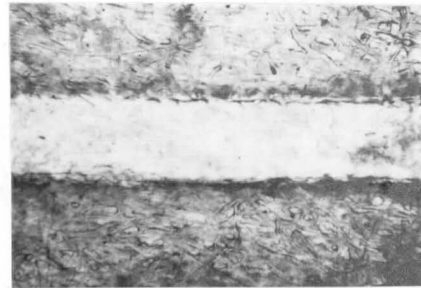


(B)部拡大

( $\times 20$ )



(A)部拡大 ( $\times 20$ )



(C)部拡大 ( $\times 20$ )

図 2.3.4 ポイド放電によるワックスの生成状況

なつたものと考えられる。

### 3.3.2 1mm絶縁厚のモデルケーブルによる実験

1mm絶縁のモデルケーブルに160%の電圧, 1500, 2250  
ならびに3000Vを印加したときの誘電正接特性の変化の一  
例を図2.3.5に示した。このケーブルの脱油条件としては,  
120℃においてケーブル端から十分油を滴下させたもので

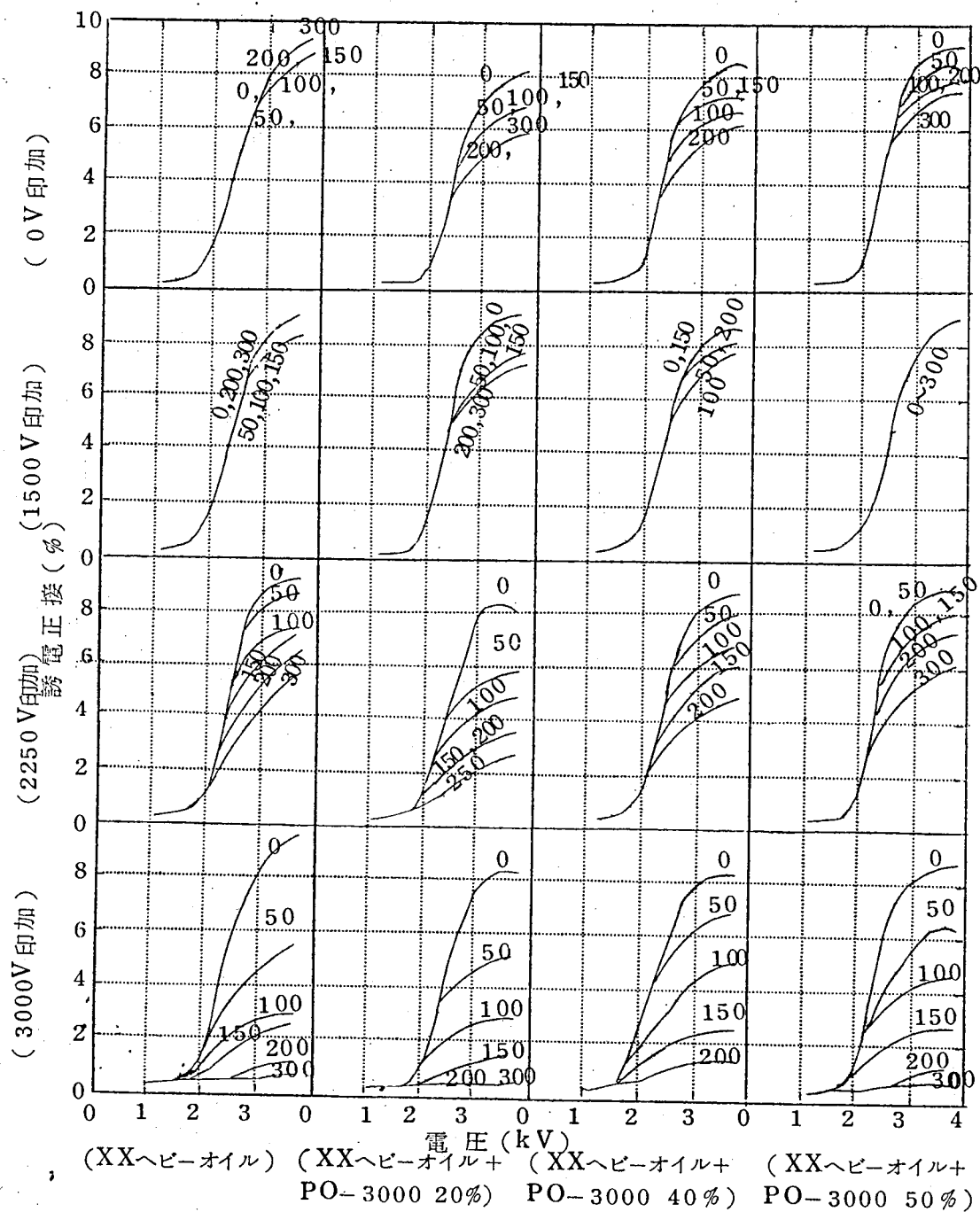


図 2.3.5 1mm絶縁モデルケーブルの電圧印加による誘電正接電圧特性の変化  
 注) 図中の数字は電圧印加後の時間(h)を示す。

あり、油浸率は実ケーブルに比してかなり小さいものである。この実験結果からもわかるように、誘電正接特性がよくなるのはボイド放電の起こる電圧を印加した場合である。ただし、この場合には絶縁は薄く、ほとんど平等電界であるため、半径方向の油の移動は考えられず、油の供給源は端末部であり、油の移動は軸方向である。このケーブルを解体してみると紙の突き合わせ間隙にはワックス化が起り始めた油が充満しているのを見ることができる。

### 3.3.3 3 mm 絶縁厚のモデルケーブルによる実験

#### (1) ボイド放電による絶縁劣化

コロナ劣化を表わすものとして誘電正接の変動の一例を図 2.3.6 に示した。コロナ放電に伴う化学変化はボイドの大きさならびに温度等が等しければ放電エネルギーに比例するものであるが、図においても 60% ならびに 160% の電圧を印加したものが、放電エネルギーの等しい状態で同様な変動の傾向を示していることより、これを確認することができた。油による差異は特に明確ではないが、No 4 の合成油 PO-1000 は PO-3000 と同系統の油であり誘電正接の増加が著しく、油単独の結果と一致している。また No 4 の極度に含浸量が少ないものを No 4' で示してあるが、このものは誘電正接の増加が少なく、これらの点より油浸紙で導電にあずかるイオンは紙よりも油から主として生成されるものと考えられる。

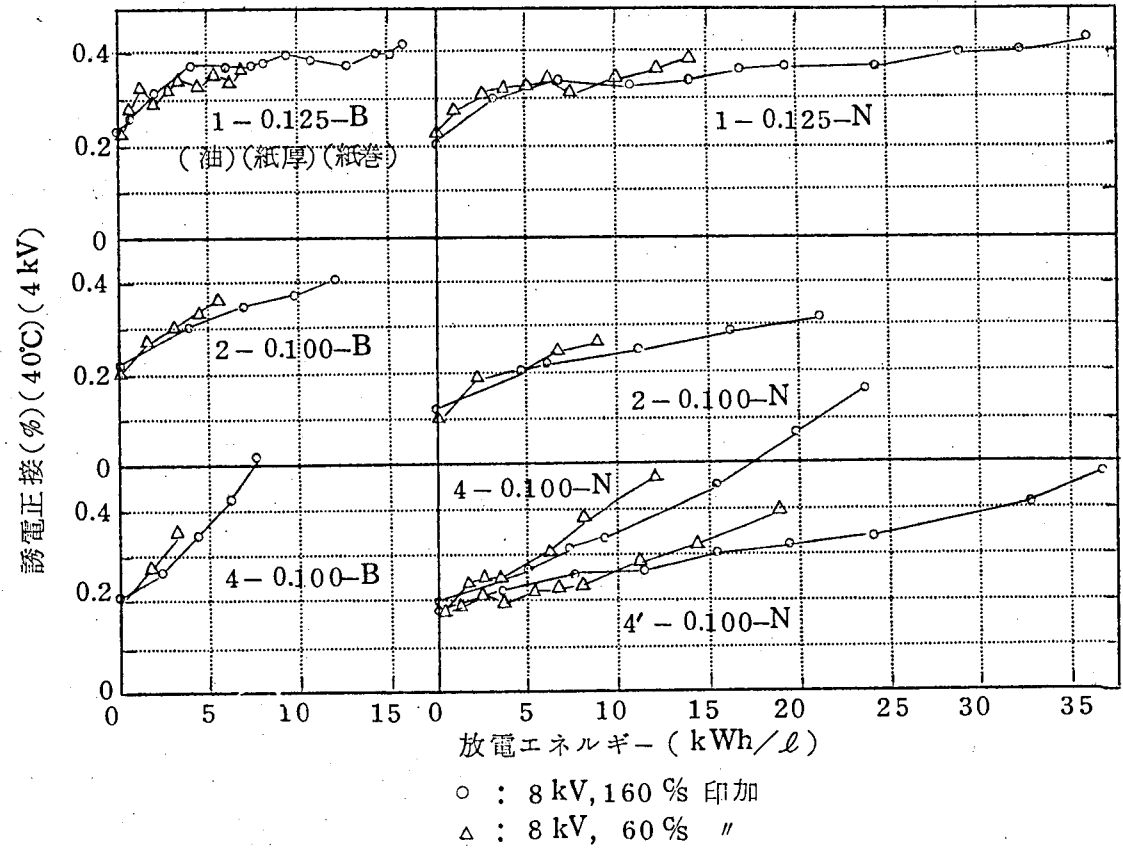


図 2.3.6 モデルケーブルのボイド放電による誘電正接の変動

## (2) 放電量の変動

ボイド放電量を示すものとして、コロナ開始電圧の約2倍の12.4 kV の誘電正接をとり、変動の一例を図2.3.7に示した。放電量の変動は不規則であるが、60% ならびに160% の電圧を印加したものを比較してみると、バットラップのものでは放電時間に関連し、ネガティブラップのものでは放電エネルギーに関連して変動しているようにみられる。ボイドに起こる変化としては前述のように油のワックス化、あるいは微細な泡立ち等放電の量に関係するものが大きいが、一方油の移動は電界による静電気力によるところも大きい。ため電圧印加時間に関連する状態変化もあるはずであり、図2.3.7の結果から、少量の油の移動で特性の変化の大きいバットラップのものは電圧印加時間により放電量の変動の大勢が決まるが、ネガティブラップのものでは油はかなり多く移動する必要がある、放電エネルギーに関係した変化が主体となることが考えられる。

## (3) 静電容量の変動

変動の一例を図2.3.8に示した。ネガティブラップのものでは多少放電エネルギーに関連する変動もみられるが、だいたいの傾向としては紙巻き方式に関係なく放電時間に関連して変動している。このことは誘電率の増加と言うことよりも、油の移動ならびにボイドの変形<sup>(75)</sup>などの物理的原因が大きく作用するものと考えられる。この場合移動する油の供給源が端末部でないことは、油浸量の極度に少ない試料(N<sub>0</sub>4')でも同様な変動をしていることより知ることができる。また図中に実験の途

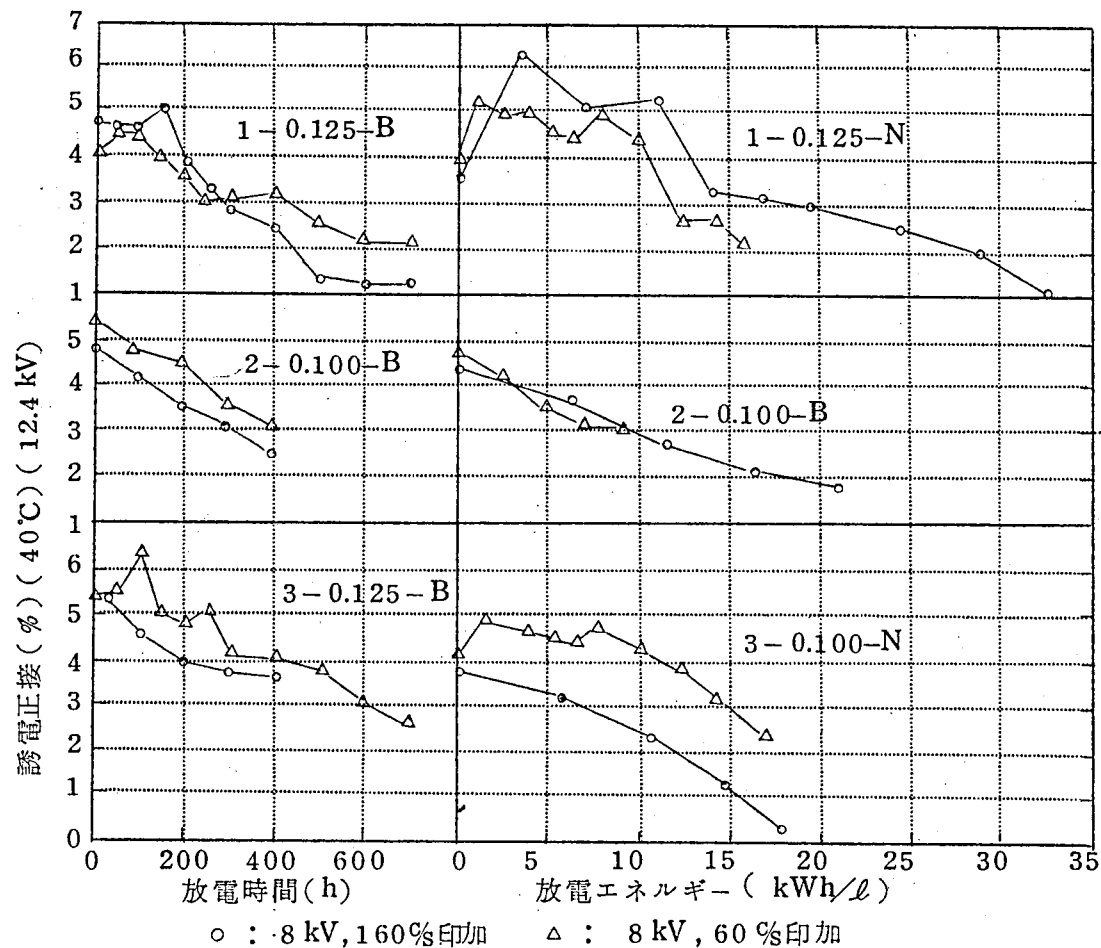


図 2.3.7 モデルケーブルのボイド放電による放電量の変動

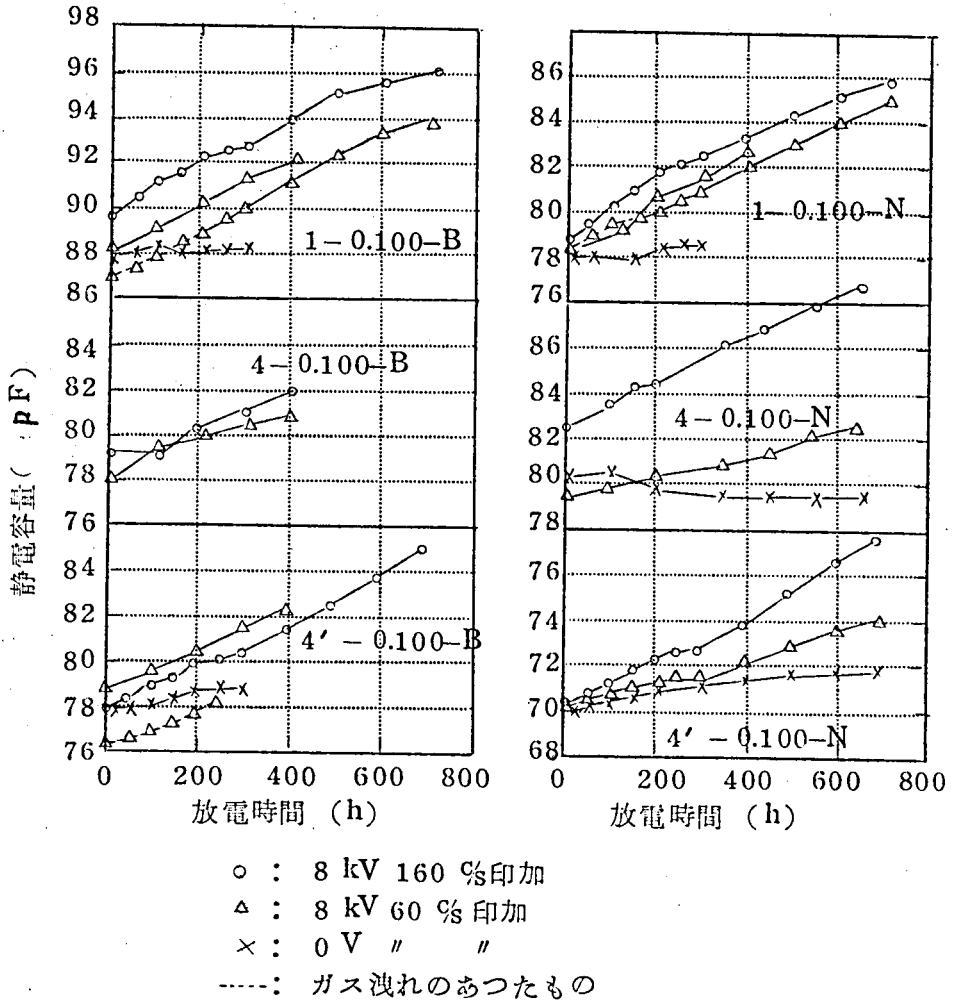


図 2.3.8 ボイド放電によるモデルケーブルの静電容量の変動

中で空気の漏入があつたものの特性を参考のために点線で示した。これらのものでは誘電正接は不連続的に大きく変動していることを確かめているが、静電容量には空気漏入の影響がみられない。このことから、ガス圧ケーブルのボイド放電による特性の変化はボイド内面の抵抗値の低下によるものはほとんど



表 2.3.2 電圧印加後のモデルケーブルのコロナ開始電圧飽和値  
(kV)

油	紙厚 (mm)	8 kV , 160 %		8 kV , 60 %		0 V	
		B	N	B	N	B	N
1	0.125	6.6	6.2	6.4	6.5	6.2	6.0
	0.100	6.4	6.2	6.1	6.2	5.5	5.0
2	0.125	6.3	6.1	6.1	5.7	5.5	5.3
	0.100	6.4	6.0	6.1	6.0	5.5	5.5
3	0.125	6.8	6.0	6.7	6.0	5.2	5.8
	0.100	7.1	5.6	6.9	6.1	5.9	5.0
4	0.125	6.9	5.8	6.9	6.5	5.4	5.8
	0.100	6.8	7.1	6.5	6.8	5.8	5.4

ないものと考えられ，この点ケーブルの自己回復作用はポリエチレンケーブル等においてボイド放電が減少する特性<sup>(44)</sup>とその機構が異なることがわかる。

#### (4) コロナ開始電圧の変動

最後にコロナ開始電圧の変動であるが，これはすでに述べたように種々の要因の組合せて起こり，実験では試料の状態も厳密な意味では等しくないので，変動の過程をみるとばらつきの多い結果であつた。しかし，電圧印加後600~700時間後にはコロナ開始電圧の飽和の傾向がみられるので，こゝでは途中の変動を考察の対象から除外してこの飽和値のみを表2.3.2に示した。表より電圧を印加したことの影響は明らかである。次にこの電圧を印加しなかつたものを除いて，コロナ開始電圧の上昇に

表 2.3.3 要因分析結果

要 因	変 動	自 由 度	不偏分散	分 散 比
油 (O)	202,750	3	67.583	11.841**
紙 厚(P)	0.125	1	0.125	—
紙 巻(L)	84,500	1	84.500	22.308**
電 圧(E)	10.125	1	10.125	2.673
O×P	9.625	3	3.208	—
O×L	113,250	3	37.750	9.96**
O×E	11.125	3	3.708	—
P×L	1.125	1	1.125	—
P×E	0	1	0	—
L×E	6.125	1	6.125	—
3,4重交互作用	49.250	13	3.788	—
O, P, L, E	488,000	—	—	—

\*\* 1%の危険率で有意である。

対して各要因がいかに影響しているかを検討するために、3重以上の交互作用を誤差としてF検定を行なった結果を表2.3.3に示した。表に示すように有意とみなされる要因は油の種類、紙巻方式ならびにこれらの交互作用であるが、このうち油の種類についてみると、コロナ開始電圧の順序はG.B.Shanklinの実験結果と異なり、粘度の低いもののコロナ開始電は必ずしも高くなっていない。もちろんこの実験結果がたどちに実ケーブルのすべての場合にあてはまると言うことではないが、自己

回復作用に関係するボイド状態の変化のうちで、放電が原因となつて起こる変化には粘度の影響がそれほど大きくないことが推定される。また前章に示したように油単独のコロナ劣化の実験においてはワックス化の起こりやすさは油の種類によりかなり差異があつたが、この順序はまた本実験におけるコロナ開始電圧の順序と特に関係はないものとみられ、結局それらの油の性質とは別な要因の存在することが考えられる。すなわち、この実験では電圧印加の実験を開始する前の余剰油の脱油の際、温度ならびに時間等の条件を各試料について同一としているため、脱油後の誘電正接特性がほぼ等しい状態となつていても油浸率ならびに油浸状態等に微妙な差異が生じ、これが見かけ上油の種類による影響となつたものと考えられる。このことはコロナ開始電圧の変動に対する油の性質の影響がそれほど大きなものでなく、製作条件の影響の方が大きいことを示すものである。紙巻き方式についてはバットラップの方が好ましいことであり、これはバットラップの場合にはボイドとなりうる部分が少ないことより推定しうる常識的結論と一致している。

この点は絶縁厚が5 mm程度の低ガス圧ケーブルには適用できることであるが、実際問題として導体寸法が大きく、かつ形状が円形でない場合には正確なバットラップを実現することはむずかしく、ケーブル製作に当つてはバットラップに近いように紙巻き条件を選ぶことは特に考慮すべき重要問題である。油の種類と紙巻き方式との交互作用が有意と検定されたのは、この実験で油No4が高粘度のために油抜きの際の脱油量が少なく、

結局油浸率が他の油を使用した試料より多いために、ネガティブラップでもコロナ開始電圧の上昇が大きかつたことに起因するものであつて、本質的なものではないものと考えられる。紙厚の影響はコロナ開始電圧の上昇に対し有意差はないが、変動の過程をみると、紙厚の薄い方が若干コロナ開始電圧の上昇速度が大きいようにも見受けられ、また周波数の影響としては160%の電圧を印加したもののの方が明らかに変動の速度は大きい、放電エネルギーで比較しうるような規則的な大きな差異は認められなかつた。

### 3.4 総括

以上述べた常圧のモデル実験により、低ガス圧ケーブルのコロナ開始電圧の上昇する機構がかなり明らかとなつた。すなわち、G.B.Shanklin が発表しているように、油のボイド内への移動とワックス化とが自己回復作用の原因と考えられるが、油の移動については、彼が述べたような機構によるものは少ない。G.B.Shanklinによれば油とガスとの誘電率の差異により、導体に近い高電界部にボイドが生じても静電気力のために誘電率の大きい油が高電界部に集まるということであるが、実際には油を移動させるに有効な電界はボイド放電によつて起こる紙層と平行方向の電界であり、また油はコロナ放電により見かけの粘度低下が起こり、容易に油の移動が起こるものである。また放電により油の蒸気がボイド内へワックスとなつて集積することも自己回復作用の有力な原因の一つである。

またケーブルの絶縁構成と自己回復作用との関連については、

絶縁油の種類による特性の差異が大きいような結果であるが、これは油単独の性質よりも、油浸率等の製作上の要因と関連してその影響が現われたものと考えられる。また紙巻き方式としてはバットラップのものが好ましい特性を示し、これは常識的結論と一致するものでもあり、紙巻き方式はケーブル製作条件として重要なものであることが明らかとなつた。

#### 4. ガス圧ゲージ1気圧下のモデル実験による自己回復作用の定量的検討 (6276)

##### 4.1 目 的

前章までの実験により、絶縁油のコロナ劣化特性；ならびにケーブルのコロナ開始電圧の上昇する機構が明らかとなつたので、ここで実ケーブルと同じく、窒素ガスがゲージ1気圧に封入されたモデル実験により、ボイド放電をうけた場合の油浸紙の電気的性能の変化、自己回復作用によりボイド放電状態の減少する速度特性、絶縁耐力をも含めた自己回復作用の実用的な効果、ならびに自己回復作用により絶縁特性安定化が期待できる最大許容電界強度等を明らかにすることができたのでここにその検討結果を述べる。

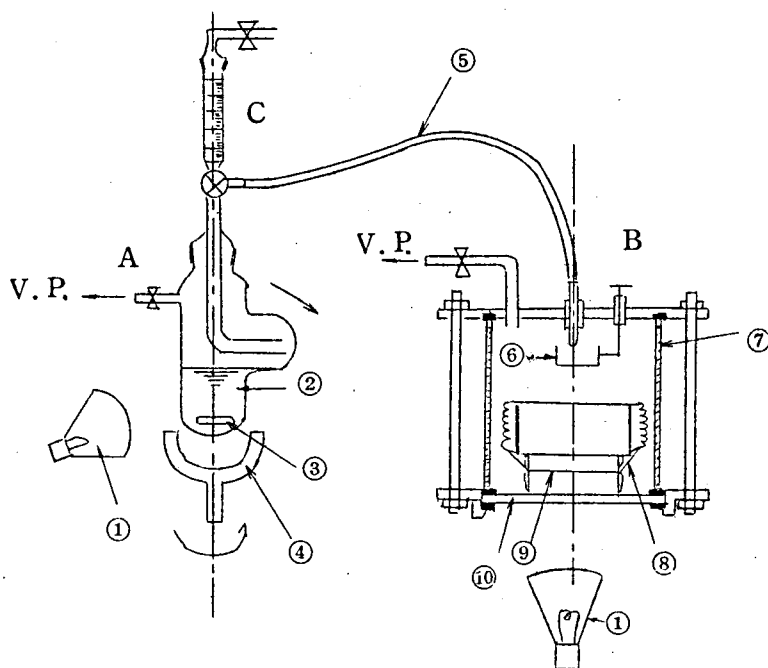
##### 4.2 コロナ放電による油浸紙の劣化特性

###### 4.2.1 実験法

油浸紙の材質的にみた組成は複雑であり、その性能は種々の条件によつて左右される。特にガス圧ケーブルに使用されるような状態では、単に化学的性質のみならず、油浸紙中

の油の量，すなわち油浸率が大きな影響を与える。さらに実際のケーブルでは，紙に含まれる油量と同時に，構造として含まれる油量，たとえば紙テープの突き合わせ間隙に存在する油も問題となり，複雑な現象が生ずる。そこでコロナ放電による劣化ならびに自己回復作用を検討するための実験では，油浸率の一定である試料が必要である。その製作方法としては，現在の低ガス圧ケーブルの製法のように，いつたん十分油を含浸してから脱油するという方法では，実験用の小さな試料の場合一定の油浸率のものを得るのは困難であるため，今回の実験では最初から一定量の油を含浸する方法をとり，図2.4.1の装置を使用した。図において容器Aでは油の脱気を行ない，Bで紙の乾燥を行なう。このように赤外線電球による乾燥を行なうのは，油浸紙とした場合器壁に油が付着して油浸率が変動するのを避けるためである。乾燥脱気の終了後Aを右側に傾け，Aの真空を破ると油は一部Cへ上昇する。次にAを立て，Cの上部の真空を破り，コックの操作によりCの目盛りを見ながら一定量の油をBに送る。これらの操作はすみやかに行ない，油面より溶解する空気が，Bに送られる油までとけこまないようにする。このようにして実ケーブルの実効油浸率とほぼ等しい30%の油浸率の試料を作製した。

コロナ劣化実験用装置は図2.4.2に示す構造のもので，130 mm  $\phi$  の油浸紙2枚を重ね，上部電極と試料との間の約0.5 mmの空間で放電を行なわせるものである。容器中には窒素ガスをゲージ1気圧に封入し，これを60℃の恒温槽中に入れてケー



- |             |                        |
|-------------|------------------------|
| ① 加熱用赤外線ランプ | ⑥ 油受け皿(油量測定後滴下する油をうける) |
| ② 絶縁油       | ⑦ ガラス筒(140mmφ, 170mmh) |
| ③ ガラス封入鉄片   | ⑧ 試料の耳(試料に4ヶ所つけ、ばねで吊る) |
| ④ 磁石        | ⑨ 絶縁紙試料                |
| ⑤ テフロン管     | ⑩ ガラス板                 |

図 2.4.1 油浸紙試料作製用装置

ブルとほぼ等しい条件とした。電源は1kcの周波数のものを使用し、コロナ放電による劣化を商用周波数で実験する場合の約20倍に加速した。

試料の誘電正接の測定は上部電極を下げ、試料を押えて行ない、コロナ劣化実験の途中の変化を測定した。破壊電圧は試

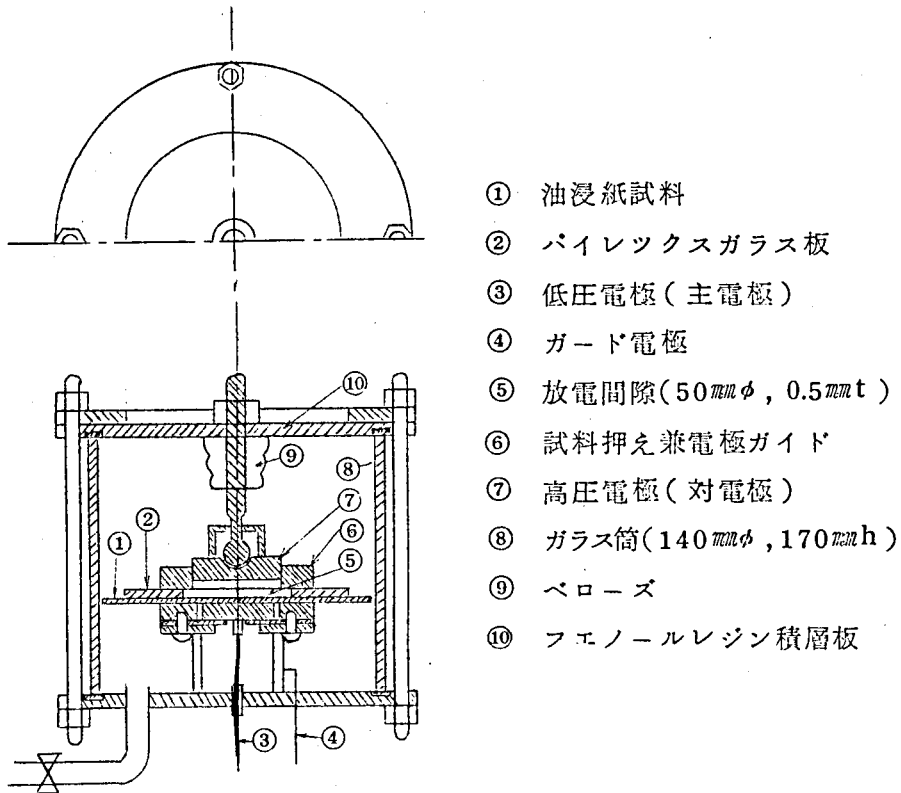


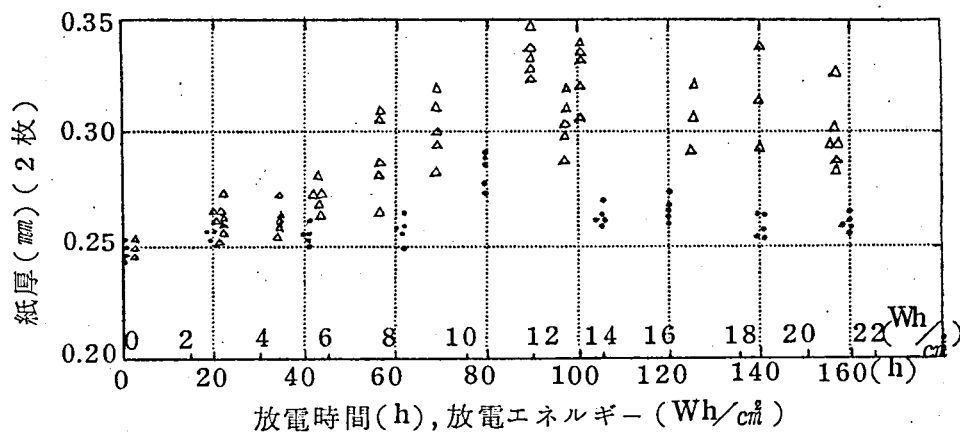
図 2.4.2 油浸紙のコロナ劣化実験用装置

料を取り出して破壊試験用電極装置に入れ，真空処理後コンデンサ油を注入し，油中で測定した。

#### 4.2.2 ワックスの生成

この実験ではコロナ放電はボイド部のみで起こっているため，試料の周辺から油が移動し，ボイド部でワックス化が起こり，試料の見かけの厚さが次第に増大する。油浸紙試料として XXヘビーオイルを単独で含浸したものと，PO-3000 を約 40% 混合した低ガス圧ケーブル用標準油を含浸したものとに





- △ : XXヘビーオイル含浸  
● : XXヘビーオイル+PO-3000含浸

図 2.4.3 ワックスの生成による有効紙厚の変動

注) 油浸紙の標準厚さは2枚重ねで0.25mmである。

ついて厚さの変動を図2.4.3に示した。測定は破壊試験を行なうために試料を取り出したときに行なつたもので、各測定値は別々の試料についての値である。図より含浸油量が等しければ粘度の高い方が移動油量の少ないことがわかる。また、この実験により油の移動はボイド放電によつて有効に起こることが再確認され、ケーブルの自己回復作用では移動しうる油の量が問題であつて、ボイドの大きさにはほとんど関係しないことが判明した。しかし実際にはボイドが大きければそれだけ多くの油の移動が起こることが必要であり、また後章に示すように実ケーブルにおいては油の移動のボイド放電によらない分

も実際には有効であり、ケーブルの紙巻き方式としてはボイド発生の可能性の少ないバツトラップがすぐれていることは当然である。

#### 4.2.3. 誘電正接特性

上述のように試料はワックスと油浸紙との複合層となるため、油浸紙自体の特性は求められないが、2種の油浸紙試料の放電による誘電正接の変動を図2.4.4と図2.4.5とに示した。ワックスの量を考慮すれば両者で特に差異はないものと推定される。またこのような試料の状態は、ケーブルにおいてボイドにワックスが充満した状態に対応するものであるが、ケーブル全体としてはボイドの占める割合は小さいので、ケーブルの誘電正接がこのような大きな値となることは考えられない。前章の油単独のコロナ劣化の実験結果に比して油浸紙の場合には高温時の誘電正接の増加が大きく、このことはイオン伝導性物質の生成が多いことを示している。これは紙と油と共存したことも一つの原因と考えられるが、この場合放電は片面金属電極（黄銅）に接するボイドで起こっているため、ワックスは紫褐色を呈しており、金属の影響も大きいと考えられる。後述する油浸紙間のボイド放電の実験、ならびに実ケーブルの長時間の寿命試験とも比較し、このような状態はケーブルではほとんど起こらない苛酷な状態と考えられ、その意味で図2.4.4ならびに図2.4.5の値を劣化の上限と考えることができ、その場合これらの値は20~30 kVのケーブルでたゞちに危険を招来する値ではないものと考えられる。

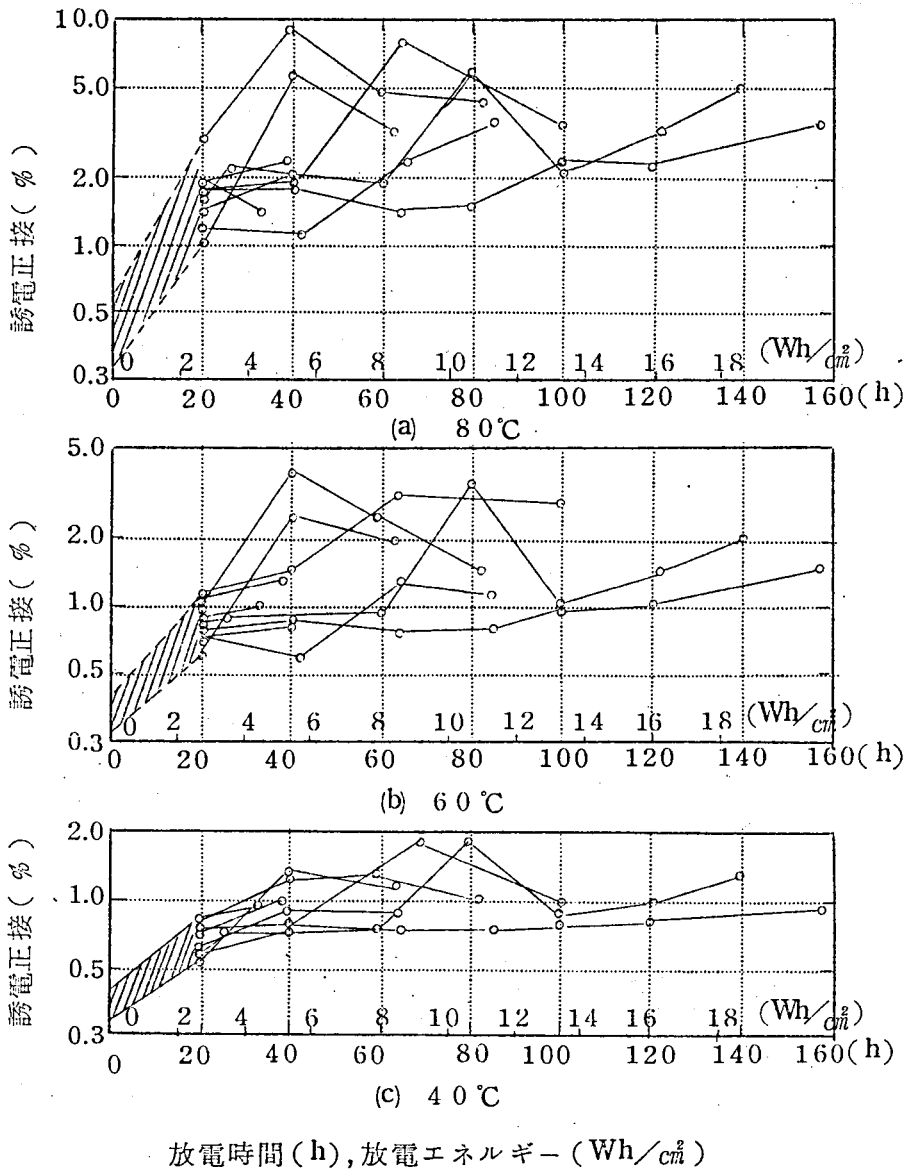


図 2.4.4 油浸紙のコロナ放電による誘電正接の変動  
(XXヘビーオイル含浸)

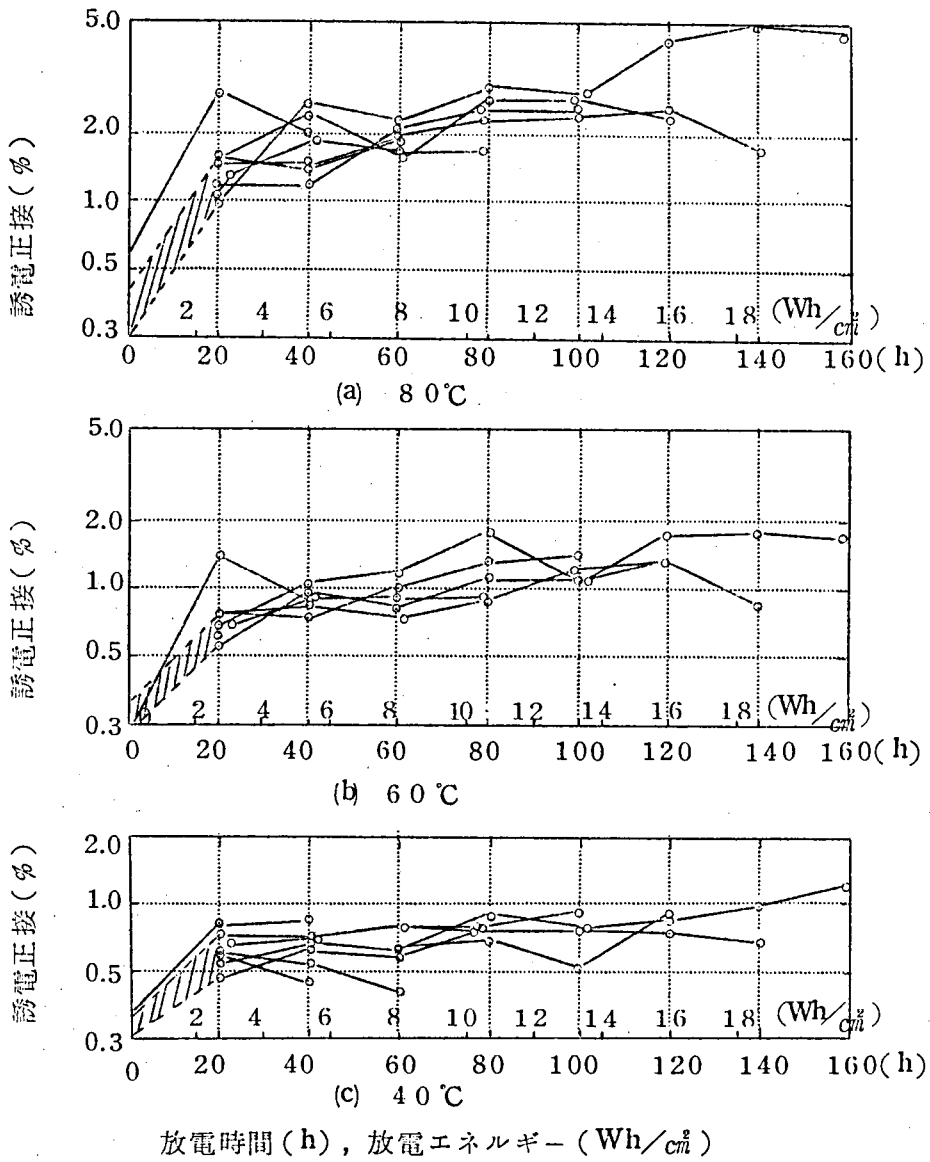


図 2.4.5 油浸紙のコロナ放電による誘電正接の変動  
(XXヘビーオイル+PO-3000含浸)

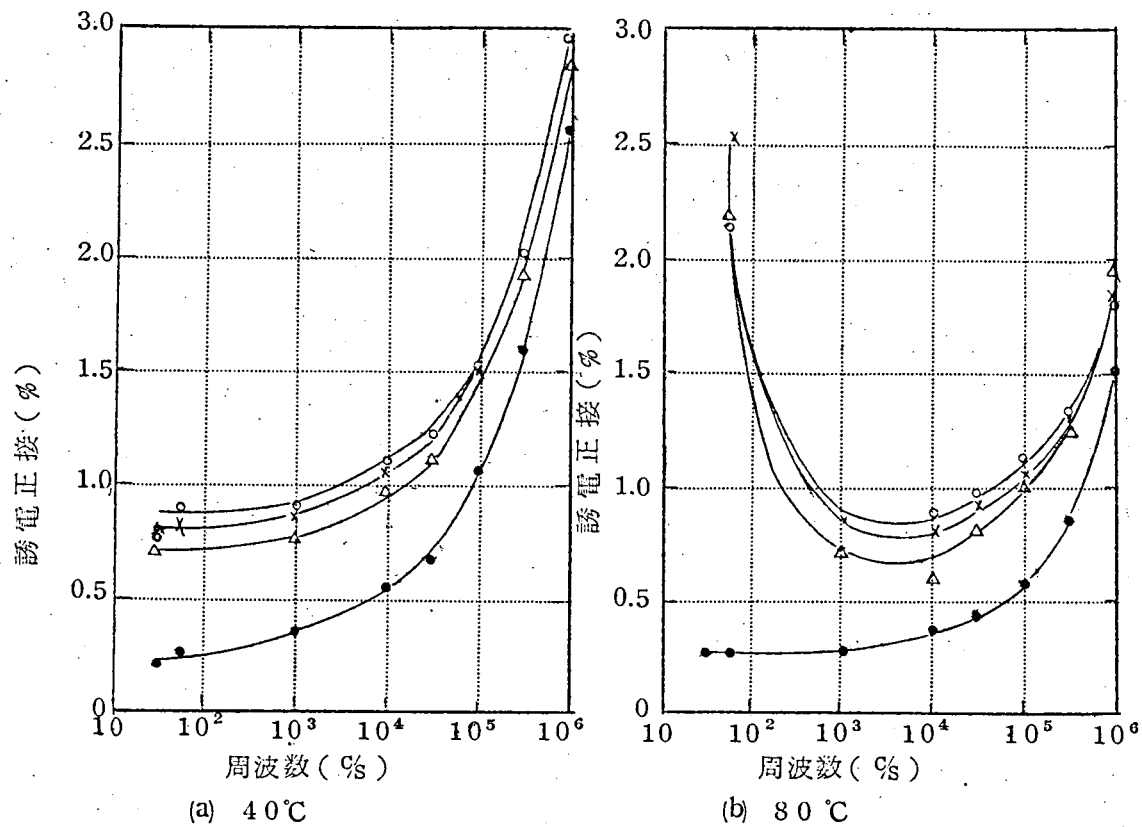
誘電正接の周波数特性の変化を図2.4.6に示した。油浸紙は複合絶縁物であり、この特性のみから正確な情報は得られないが、紙自体が本質的に分子構造的な変化をしてゆくとは考えられず、単なるイオン伝導の増加のみであると推定される。

#### 4.2.4 破壊電圧

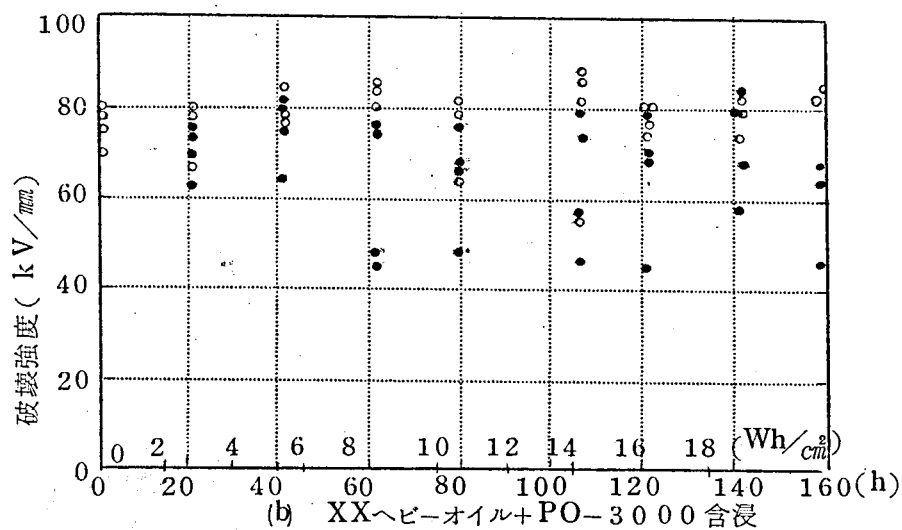
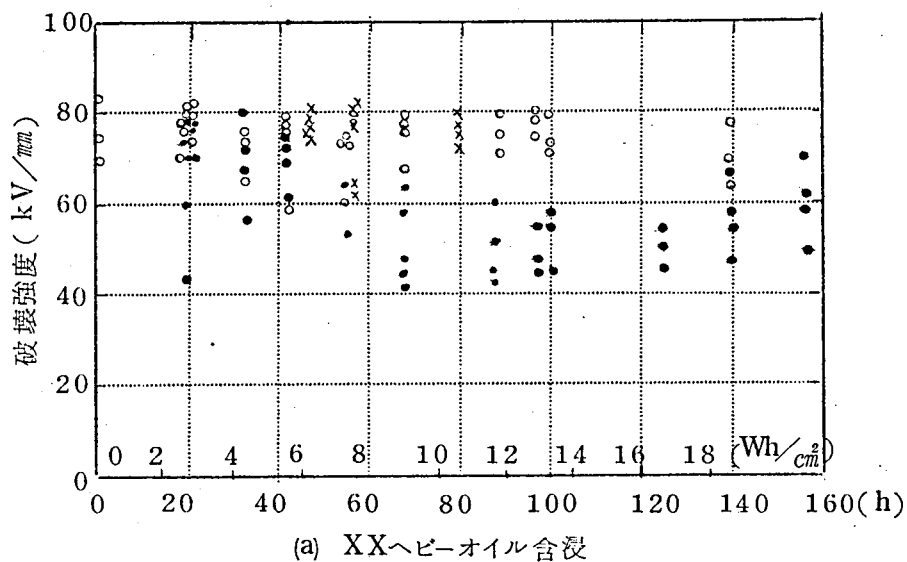
破壊電圧の変動を図2.4.7に示した。こゝで電界強度はワックスのために増加した後の厚さについて求めたものである。比較のために、放電の影響を受けない試料の周辺部の強度も同時に求めて図示した。図に示すようにコロナ放電をうけることにより破壊電圧は低下し同時にばらつきも多くなっているが、その機構を検討するため、一部の試料についてワックスを取り去った後の破壊電圧を求めた。図2.4.7(a)に示すこれらの値は、コロナ放電をうける前の値に比してほとんど低下していないと考えることができる。このことより、破壊電圧の低下はワックスの生成による構造変化が原因で起こつたものであり、油浸紙自体の材質的劣化はほとんど起こらないものと考えられる。しかし、放電がなんらかの原因により局部的な侵食等の劣化を起こせば当然破壊電圧は著しく低下することが予想され、これらについては後述の油浸紙間のボイド放電の実験により検討を行なつた。

#### 4.2.5 乾紙のコロナ劣化特性

放射線照射を受けた場合には、紙は絶縁材料としては劣化しやすいものであることが知られている。しかし、前述のように油浸紙はコロナ放電によりほとんど劣化が起こらない。この



● : 0h, △ : 40h, × : 80h, ○ : 120h, (放電時間)  
 図 2.4.6 コロナ放電を受けた油浸紙の誘電正接特性



放電時間(h), 放電エネルギー (Wh/cm²)

- : 非放電部分
- : 放電による劣化部分
- x : " " (ワックスを除去したもの)

図 2.4.7 コロナ放電を受けた油浸紙の破壊強度

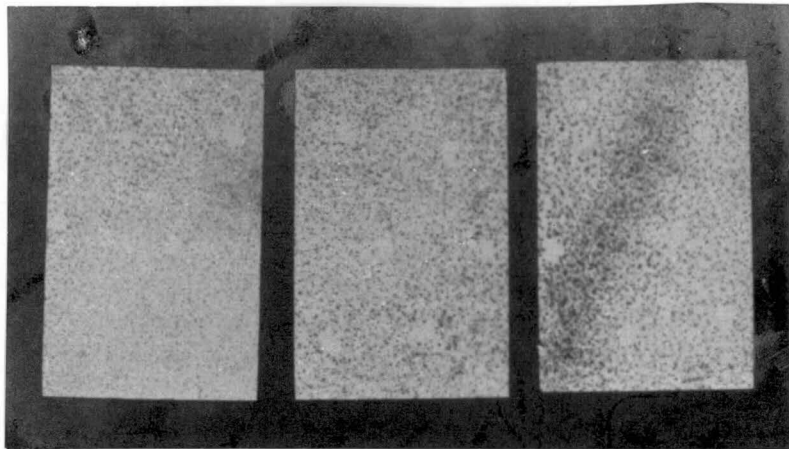
ような相違が生じた原因を検討する一手段として、乾紙についてのコロナ劣化の実験を行なった。ここで紙はシリカゲル封入のデシケータに保存したものを使用した。実験は第1部で述べたようなフランスの委員より I.E.C. へ提案された方法に準拠したものであつて、劣化実験用セルには1mm厚のガラスを使用し放電間隙長は1mmとした。試料は0.125mm厚の乾紙1枚を使用し、印加電圧は6kVである。実験は常温常圧の窒素ガス中で行ない、電源は1.8kcのものを使用した。電極温度は調節を行なっているために、試料の平均温度の上昇はほとんど起こらないが、試料には非常に短時間で小孔が貫通する。小孔の貫通が認められるまでの最小放電エネルギーは約 $1.3 \frac{\text{Wh}}{\text{cm}^2}$ であり、電界強度を考慮すれば、この値は他の固体絶縁材料に比して非常に小さいものである。第1部に示したように固体絶縁材料のコロナ劣化においては、寿命は単に放電による試料の分解、ならびに消耗の速度ばかりでなく、均一消耗から不均一局部消耗に移行する条件が問題であり、この点で紙のように表面の平滑でないものはそのまゝでは寿命が短くなりがちであるが、それらを考慮しても、紙は材質的にコロナ劣化の起こりやすいものと考えることができる。比較的長時間の実験で多くの小孔が生じた一例を図2.4.8に示した。

#### 4.3 油浸紙間のボイド放電による自己回復作用

##### 4.3.1 実験法

30mmφの油浸紙(0.125mm厚、油浸率32%)を3枚重ね、中央の紙には20mmφの孔をあけてこれをボイドとし、





(a)  $13 \text{ Wh/cm}^2$

(b)  $25 \text{ Wh/cm}^2$

(c)  $38 \text{ Wh/cm}^2$

図 2.4.8 常圧窒素中のコロナ放電による侵食孔の発生状況  
(クラフト紙, 0.125 mm厚)

図2.4.9に示すような電極構成として電圧を印加し、ボイド内で放電を起こさせた。この場合も電源は1.8 kVのものを使用して変化を加速した。容器内には前節の実験の場合と同じくゲージ1気圧の窒素ガスを封入し、60℃の恒温槽中で実験を行なった。絶縁紙をネガティブラップにまいたケーブルでは約15 mm幅の紙より0.5～1.0 mm幅のボイドに油を供給するものと考えられるが、この実験では3枚の紙から油がボイドに流入するとして紙とボイドとの面積比を決定した。含浸油はXXヘビーオイルを単独で使用了。

#### 4.3.2 モデルと実ケーブルとのボイド放電に対する等価性

ボイド放電のない均一材料についての実験の場合と異なり、

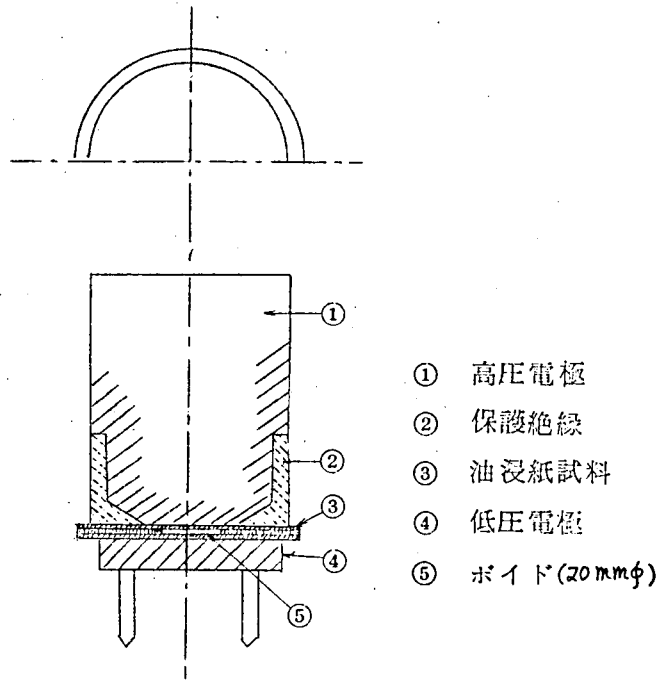


図 2.4.9 モデルボイドをもつ実験用電極装置

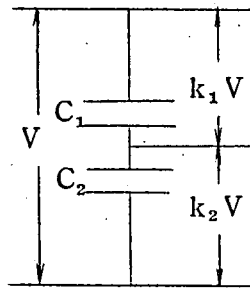
ボイド放電が起こる場合には、単に平均電界強度のみでは異なつた構造についての実験結果を比較することはできない。モデル実験の結果をケーブルに適用するために両者の等価条件について次のような検討を行なつた。

まず電源周波数については、すでに第1部でも述べたように印加電圧と構造とが等しければ1%中に起こるコロナパルス数は低周波領域では等しいと考えられる。したがつてこの範囲内で周波数を上昇させると放電エネルギーは周波数の倍数だけ大きくなる。この実験では外気の流通を考慮する必要はな

いため、放電による熱のための温度上昇が大きくならなければ周波数の倍数だけ変化を加速したと考えるとさしつかえない。

次に電圧については、ボイド放電の絶縁材料に及ぼす影響を衝突する電子ならびにイオンの個々のエネルギーのみによるとすれば、放電時のボイド内の電界強度はガスの状態のみで定まるため、印加電圧の大小は1%中の放電回数の大小だけの問題となる。しかし、実際にはボイド放電により絶縁破壊が起こるまでの時間については、単に放電回数の大小で比較できないほど大きな電圧の影響をうける。したがって、ここでは放電時油浸紙にかかる電界強度を等しくする電圧を等価電圧と考えた。

ボイドを含む絶縁構造の等価回路として図2.4.10に示す回路を考え、比較すべき実ケーブルとしては100mm<sup>2</sup>の圧縮導体で絶縁定格20kVの低ガス圧ケーブルを考える。ケーブルにおいてボイドは実際的な最悪条件として絶縁最内層にあるものとする。等価回路 $C_1$ ならびに $C_2$ の電圧分担比( $k_1, k_2$ )は図に示すような値となる。ボイド放電が起こると図1.3.5に示すように油浸紙に印加される電圧は不連続となるが、近似的には正弦波として取扱うことができる。すなわち、 $C_1$ ならびに $C_2$ に印加される電圧波形を示すと図2.4.11のようになる。図では放電の起こる位相ならびに波形を検討するために、印加電圧を一定とし、ボイド放電電圧 $V_0$ を変動させた場合の波形を示したが、印加電圧を変動させた場合にも同様な関係が得られる。このように放電時油浸紙に印加される電圧を正弦波と考えて、モデルとケーブルとの等価電圧の関係を求めると図2.4.12の(a)が得



$C_1$  : ボイド部静電容量  
 $C_2$  : 直列油浸紙部静電容量

ケーブル モデル

$k_1$	0.101	0.642
$k_2$	0.899	0.358

図 2.4.10 ボイドを含む構造の等価回路

られる。ここでは放電中ボイドの電圧は一定値に保たれると  
 しているが、実際にはすでに述べたようにボイド内の各放電点  
 では、放電の発生消滅をくり返し、放電が消滅するときのボイ  
 ド電圧はかなり低く、極端な場合にはボイド間電圧が零となつ  
 て放電が消滅する。この場合には全電圧がボイドと直列の絶  
 縁物に印加されることとなり、この条件では等価電圧の関係は  
 図2.4.12の(b)となる。実際には(a)と(b)との中間に真の等価  
 関係があるものと考えられるが、ここでは安全率をみて(a)をと  
 ることとする。

等価の時間については等価電圧における両者の1%中の放電  
 回数を計算し、これと周波数との比より図2.4.12の(c)の関係が得  
 られる。ただし、この場合に等価電圧としては(a)の関係をと  
 り、放電回数の計算は放電消滅電圧を零として求めたものであ  
 る。

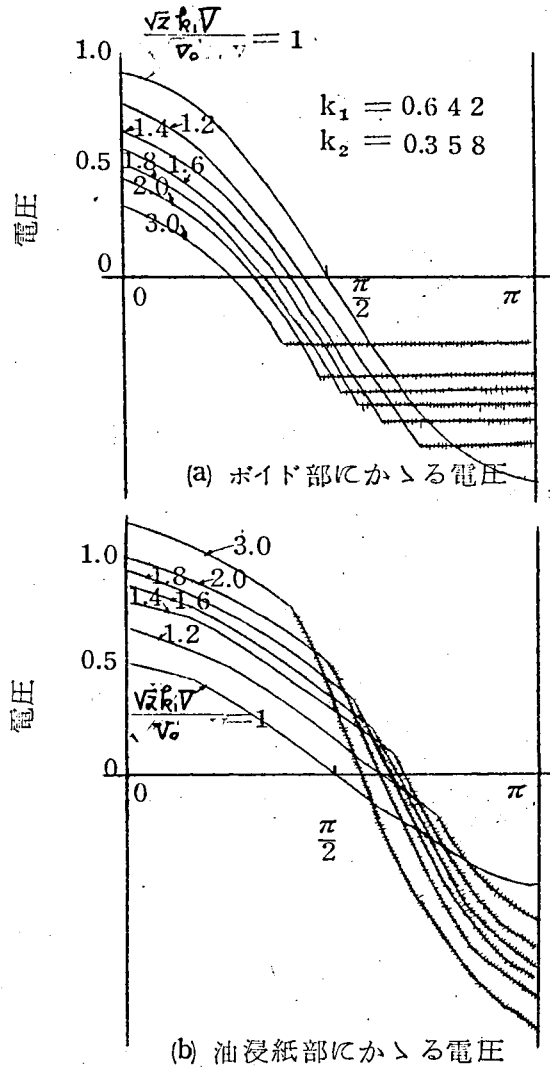
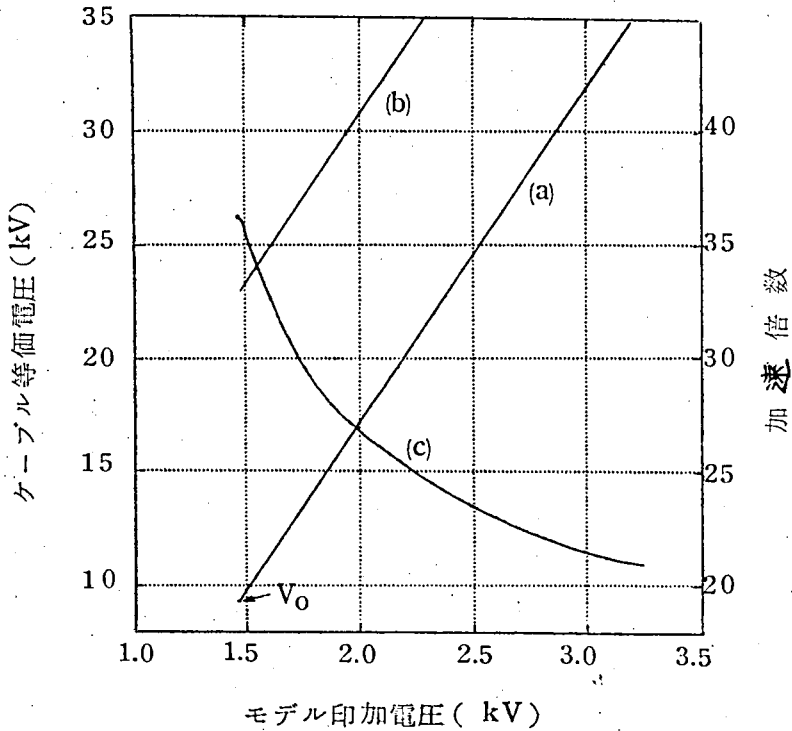


図 2.4.11 ボイド放電が起こった場合ボイドならびに油浸紙にかゝる電圧波形

#### 4.3.3 ボイド放電の減少状態

ボイド放電が継続すると放電量は次第に減少してゆくが、ここでは放電量を表わすものとして放電電力をとりその測定結果の一例を図2.4.13に示した。印加電圧を大きくするとボイ



- (a) } ケーブル等価電圧  
 (b) }  
 (c) : 加速倍数  
 $V_0$  : コロナ開始電圧

図 2.4.12 モデルと実ケーブルとの等価関係

ト放電が消滅する以前に絶縁破壊するものの数が多くなるが、放電電力の変動の傾向は図2.4.13とほぼ同じである。電圧印加後、短時間で放電電力が零となつたものは、油没量ならびに試料中の油の分布の不均一により比較的多くの油がボイド周辺にあつて、それがボイドに流入したものである。これらの

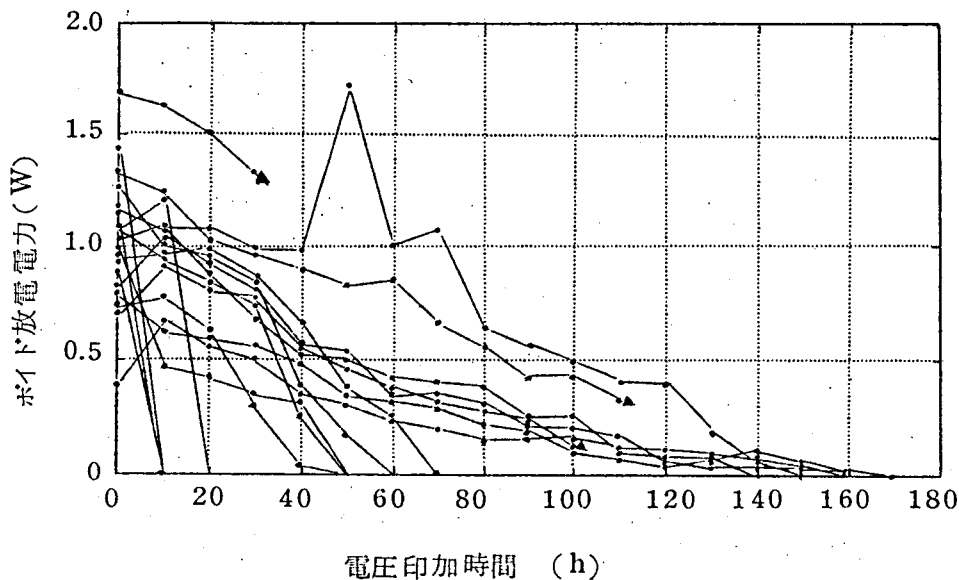


図 2.4.13 ボイド放電電力の変動

注) (1) ▲ 印は電圧印加中絶縁破壊したものを示す。

(2) 実験条件 2.6 kV. 1.8 kc 電圧印加

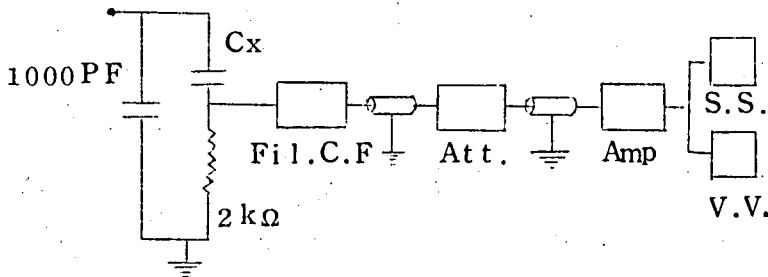
試料を解体してみると、ワックス化のほとんど認められない油がボイドに充満している。これに対し数十時間以上放電の続いた後に消滅したものでは、ボイドにはワックス化した油の充満しているのが認められる。ただし、前者のボイド中のワックス化しない油も長時間電圧印加を続けると、温度の変動の他に若干の移動が起こり、電力測定ができない程度の微小な放電によつて次第にワックス化されてゆくことが確かめられた。

図2.4.12の特性と比較して、ケーブルの場合、自己回復作用に

より安定化するまでの時間のだいたいの値を推定することができる。

#### 4.3.4 コロナ開始電圧

図2.4.13において放電電力が零となつた後、さらにある程度の時間電圧印加を続けた試料について、高感度のコロナ検出器によりコロナ開始電圧がこのときの印加電圧以上に上昇していることを確認することができた。すなわち図2.4.14の測定回路において、コロナパルス電圧0.02V,すなわち放電電荷として $2 \times 10^{-12}$ クーロン以上の放電が起こる電圧をコロナ開始電圧とし、その測定結果を表2.4.1に示した。こゝでは実験の都合上図2.4.13に示した全実験試料についての結果は求めてないが、同様な結果が得られるものと考えられる。従来ケーブルにおいて個々のボイドの微小な放電を検出することが



- Fil : 高域濾波器
- CF : インピーダンス変換器
- Att : 減衰器
- Amp : 増幅器
- S.S. : シンクロスコープ
- V.V. : 真空管電圧計

図 2.4.14 コロナ検出回路



表 2.4.1 モデルボイド装置の実験におけるコロナ開始電圧測定結果

印加 電圧 (kV)	試料 No	放電消滅 時 間 (h)	第1回コロナ検出試験		第2回コロナ検出試験		ワックス の有無
			電圧印加 時間(h)	コロナ開始 電圧(kV)	電圧印加 時間(h)	コロナ開始 電圧(kV)	
2.6	1	170	270	1.30	392	2.70	あり
	2	150	297	1.60	413	2.20*	〃
	3	50	223	2.70	—	—	〃
	4	140	227	2.40	274	2.80	〃
	5	160	220	1.40	356	2.75	〃
	6	60	297	2.70	—	—	〃
	7	70	96	2.25	236	2.25*	〃
2.9	8	80	134	2.95	—	—	あり
	9	80	145	2.90	—	—	〃
	10	20	25	2.95	—	—	なし
	11	40	134	1.60	292	3.00	あり
	12	10	123	1.65	283	3.40	なし
	13	40	92	3.50	—	—	〃
	14	70	246	3.00	—	—	あり

注1) 放電消滅時間は放電電力の零となるまでの電圧印加時間である。

(2) コロナ開始電圧は見かけの放電電荷  $2 \times 10^{-12}$  クーロン以上の放電が生ずる電圧である。

(3) 第1回のコロナ検出試験でコロナ開始電圧が自己回復作用実験時の印加電圧より高いものは実験を終了とした。

(4) \* 電極の保護絶縁物の亀裂により見かけ上低いコロナ開始電圧となつてはいるが、ボイドの状況は他と差はなく、満足な自己回復作用が起こつてはいるものである。

非常に困難であるため、実用的には誘電正接の電圧特性よりコロナ開始電圧を求めるのが普通であつた。したがつて、自己回復作用の起こつた後の真のコロナ開始電圧は測定することができず、自己回復作用の効果についても若干の不安はまぬがれなかつた。すなわち誘電正接の値に影響しないような微小な放電でもこれが長期間継続する場合には絶縁劣化の原因となることは当然考えられるからである。この実験で確かめられたように完全に放電が起こらなくなれば、その後の劣化は起こらないものと考えられ、ケーブルの寿命についてはこの状態に達するまでの絶縁性能の変化を検討すればよいこととなる。ここでワックスの生成状態は放電消滅時間に関係し、放電消滅までにうけた放電量が多いものはかなりかたいワックスとなつてゐるが、今回の実験の範囲では、前述の油単独のコロナ劣化の実験により  $100\text{ mmHg}$  の窒素中で約  $50\text{ kWh/l}$  のコロナ放電をうけた場合、あるいはまた前節に述べた油浸紙についての実験時、ゲージ1気圧の窒素中で約  $10\text{ Wh/cm}^2$  のコロナ放電をうけた場合のワックスの方がはるかに化学反応としては進んでゐるものであり、実際のケーブル中では放電によつてワックス化が起こるとしてもその程度はわずかであるうちに放電は停止するものと考えられる。

#### 4.3.5 耐圧試験結果

図2.4.9 の電極構成において長時間電圧印加実験前の破壊電圧はボイドのために低くなつてゐるが ( $3\text{ kV/sec}$  の電圧上昇速度において平均  $10.34\text{ kV}$  , 標準偏差  $0.76\text{ kV}$ ) 自己回復

作用によりボイドにワックスが充満した試料では全部15 kVの耐圧試験に合格し、材料としての劣化は若干起こっていることが当然考えられるにもかかわらず、構造としての絶縁耐力はかなり上昇していることが確認された。ここに耐圧試験は常温で実験容器のまゝゲージ1気圧の窒素ガスの満たされた状態で商用周波の電源を使用して行なつたものであり、電圧上昇速度は3 kV/secであつて15 kVに保持する時間は約20秒である。

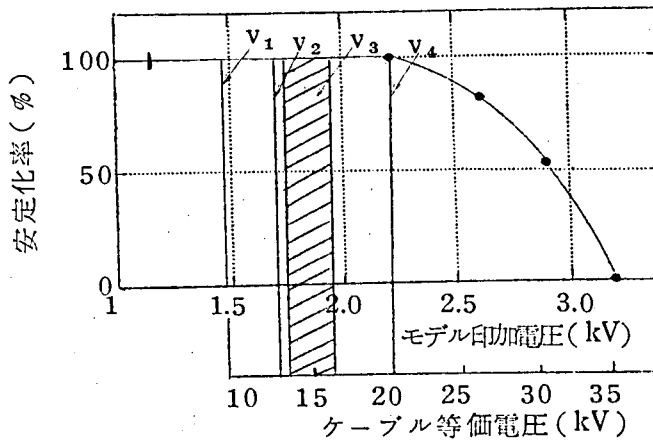
#### 4.3.6 自己回復作用による安定化率

各印加電圧について実験途中で絶縁破壊の起こつたものを除いて、放電電力が零となつて安定化したものの全実験数に対する割合を安定化率とすると、図2.4.15の特性が得られる。

図2.4.12の等価電圧により実ケーブルの場合の値を求めると、連続印加を対象とした最高許容電圧は初期のコロナ開始電圧よりかなり高いことがわかる。こゝに示した等価電圧は前述のようにかなり大きい安全率をもつているため、図2.4.15の関係は十分実用に供せられるものであり、低ガス圧ケーブルのすぐれた性能を推定することができる。

#### 4.4 総括

以上の結果を総合し次のような諸点を明らかにすることができた。すなわち、絶縁紙は乾紙の状態ではコロナにより短時間に絶縁破壊に至るものであるが、油浸紙の状態では劣化しにくい性能を示し、ボイド放電による絶縁耐力の低下はほとんど起こらない。これは第1部においても述べたように、ボイド放電の場合には放射線照射



- $v_1$  : コロナ開始電圧 (ケーブルでは最内層の  
 : ボイドに対応)  
 $v_2$  : 20 kV ケーブル使用電圧  
 $v_3$  : ケーブル製作時のコロナ開始電圧  
 $v_4$  : 連続印加許容限界電圧

図 2.4.15 自己回復作用による安定化率

等の場合と異なり、個々の電子ならびにイオンの持つエネルギーは  
 わずかであるため、その影響はほとんど表面に局限される。 した  
 が、油浸紙では油が放電を受けてワックス化を起し、これが表  
 面を保護するため紙はほとんど劣化しないものと考えられる。 こ  
 こで使用した油は油単独の実験でも確認されたように、放電により  
 安定なワックスになりやすいものであるためにこのようなよい性能  
 が得られたものと考えられる。 このように油浸紙のコロナ劣化の  
 速度は小さいことが明らかとなつたが、ワックス化が進み、固体状  
 態となつてもなおボイド放電が継続すれば、固体絶縁材料のコロナ

劣化の様式に従つて、ついには絶縁破壊に至るものと考えられる。

したがつて、実用的な性能としては使用中にコロナ開始電圧の上昇が起こり、ボイド放電が起こらなくなるまでの時間が問題である。

しかし、この点についての実験結果では、油浸率が通常のケーブルと同程度であれば、自己回復作用による放電の消滅は早く、それまでに起こる材質的なコロナ劣化はわずかであり、絶縁耐力も自己回復作用によつてボイドにワックス化した油が充満した状態では、ボイドの存在する初期状態よりかなり高くなることが明らかとなつた。

また自己回復作用によつては単にボイド放電の大きさが減少するのみでなく、コロナ開始電圧は完全に上昇し、実際問題としては絶縁劣化の原因が完全になくなることを確認することができた。なお自己回復作用を期待しうる最高許容電界強度も、現在のケーブルの設計電界強度より十分高いことが判明し、標準の低ガス圧ケーブルは、十分高い安全率があり、長期の寿命を期待できることが推定される。

## 5. 中ガス圧下の自己回復作用の検討

### 5.1 目 的

以上の実験により、低ガス圧ケーブルの自己回復作用についてはその機構、ならびに実用的な効果等が明確になつたが、同様なことがガス圧のさらに高い場合に成立するや否やを検討することは実的に重要なことと考えられ、前章と同様な実験を窒素ガス圧ゲージ4気圧の場合について行なつたものである。

### 5.2 実験による考察

前章と同じく安定化率を求めると図2.5.1のようになる。 4

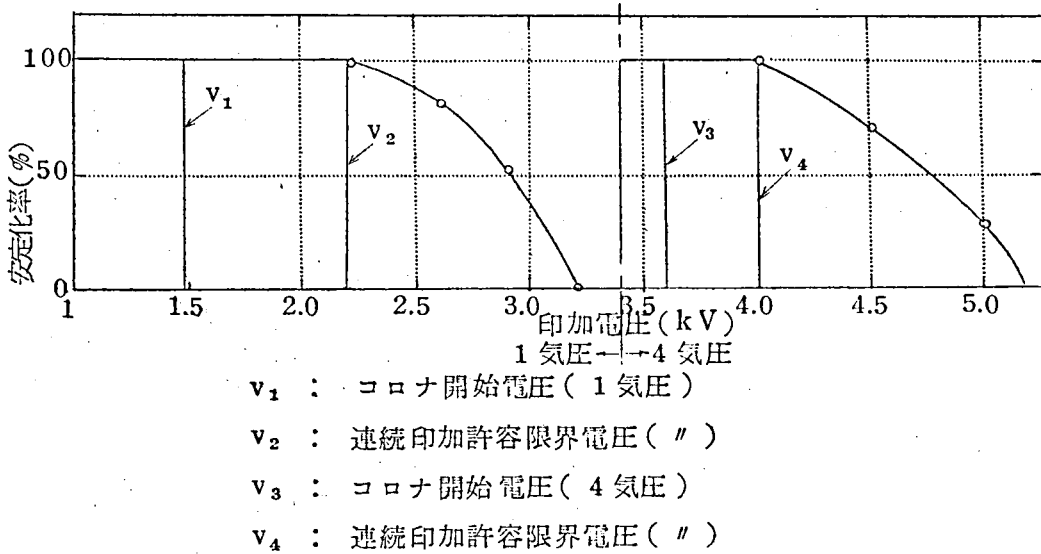


図 2.5.1 自己回復作用による安定化率とガス圧との関係

気圧の特性が1気圧の場合と異なる点は、1気圧の場合にはボイド放電が続くとボイドには次第にワックスが充填し安定化するものが多いのに対し、4気圧の場合には短時間に油が流入してボイド放電が消滅したものは異常がないが、ボイド放電がある程度続いて起こつたものでは、放電は次第に減少するにもかかわらず、放電が消滅する前に絶縁破壊するものが多いことである。短時間に油が流入したものは当然ワックス化はほとんど起こらず、この状態が実ケーブルで起こつたとしても、温度の変動等により簡単にボイドの再発生が考えられ、この点を考慮すれば図2.5.1の特性はさらに左側に移動して考えるべきである。次に4気圧ではボイド放電が開始する電圧は1気圧に比してはるかに高くなるが、自己回復作用を期待しう

る許容限界電圧とボイド放電の開始する電圧との比は1気圧の場合よりはるかに小さくなっている。したがって、ガス圧ケーブルにおいてガス圧をゲージ1気圧以上に上昇させる場合には、コロナ開始電圧の上昇する特性を利用すべきであつて、ボイド放電が起こる状態で使用すべきではない。この点G. B.

Shanklin<sup>(77)</sup>の見解と一致した結論である。このように、ガス圧が高い場合に自己回復作用が期待できない原因について定量的には明確でないが、定性的にはガス圧が上昇すると個々の放電のエネルギーが大きくなり、絶縁材料が損傷を受けやすいためと考えられる<sup>(78)</sup>。

ここで逆にソリッドケーブルで自己回復作用が問題にされない理由について考えてみる。ソリッドケーブルでも前章までの実験で示すように、ボイド放電が起こればボイドへの油の流入、ならびにボイド内の油のワックス化が起こり、放電量の減少は起こるはずである。しかし低ガス圧ケーブルでもそうであるが、自己回復作用によつては、たとえばOFケーブル、あるいはまた製作直後のソリッドケーブルのように、厳密にはボイドが完全に油で充満された状態にはならず、ボイドで放電が起こる電圧が上昇するにすぎない。したがってソリッドケーブルでボイドが生じた場合には内部のガス圧も低く、たとえ自己回復作用によりコロナ開始電圧が上昇したとしても使用電圧まで上昇し得ないものと考えられる。すなわちソリッドケーブルではその優秀な初期状態が比較の対象であり、一度ボイドが生ずればコロナ開始電圧は使用電圧以下となつてしまうため、

自己回復作用による若干のコロナ開始電の上昇は実用的には問題にならないものと考えられる。

### 5.3 総括

以上の実験により自己回復作用は低ガス圧ケーブルにおいてのみ実用的に重要な意味をもつことが明らかとなつた。すなわちガス圧をさらに上げればコロナ開始電圧の上昇は大きい、自己回復作用を考慮した許容電界強度はそれほど大きくなり、一方ガス圧を加えないソリッドケーブルでは、自己回復作用によりコロナ開始電圧の上昇が起こつても、現在一般に採用されている設計電界強度下で使用する場合には、一度ボイドが発生すればコロナ開始電圧が使用電圧以上に上昇することは困難である。これに対し低ガス圧ケーブルにおいては、設計電界強度はソリッドケーブルとほぼ等しく、製作時の脱油によつて起こるコロナ開始電圧の低下はガス圧を加えることによつて補われており、自己回復作用によるコロナ開始電圧の上昇は、そのまゝ安全率の増大となるものである。

## 6. 実用電力紙ケーブルによる自己回復作用の検討 <sup>(62) (79)</sup>

### 6.1 目的

前章までに示したように、低ガス圧ケーブルの自己回復作用については、モデルケーブルならびに絶縁を構成する素材等について実験を行ない、その機構を解明し、誘電正接ならびに破壊電圧に及ぼす影響等を種々検討し、自己回復作用がケーブルの寿命という点で非常に都合な性質であり、かつ現在のケーブルは最初のコロナ開始電圧が比較的低いにもかかわらず安定な性質を有するものである



ことを推定することができた。しかし一般にモデルによる実験はすべての点で実際の場合と等価にすることは不可能であるので、これまで得られた結果を総合的に検討するため、実ケーブルによる実験を行ない、誘電正接、コロナ開始電圧の変動ならびに破壊電圧等について検討し、低ガス圧ケーブルのすぐれた性質を再確認することができたのでここにその検討結果を述べる。

## 6.2 実験法

### 6.2.1 水平布設ケーブルの実験

実験試料は $100mm$ の圧縮導体で $20kV$ 絶縁(絶縁厚 $5.1mm$ )の単心実験用低ガス圧ケーブルである。すなわち実際には同一鉛被内に3心を収めた3心ケーブルが使用されるが、ここでは単心として鉛被内径を絶縁外径より大きくし、この間隙をガス通路とするものである。この場合もちろん絶縁上には遮蔽銅テープがあり、これが接地されている。絶縁油は現行の標準含浸油(XXヘビーオイル, 60% + PO-3000, 40%)と、更に高粘度とした油(XXヘビーオイル, 40% + PO-3000, 60%)との2種類である。試料の有効長は $5m$ で、これらを端末をも含めて水平に布設し、ケーブルヘッド内の端末補強絶縁にはハイボンテープ(自己融着性絶縁テープ)ならびにポリエステル樹脂を使用し、実験中ケーブルにケーブルヘッドより余分の油が流入するのを避けた。印加電圧は使用電圧の $1.27kV$ 、その $1.5$ 倍( $19.1kV$ )ならびに $2$ 倍( $25.4kV$ )の3段階について行ない、ヒートサイクルは導体に通電する方法をとり、実験は1日に $10.5$ 時間ずつ行なつた。この場合

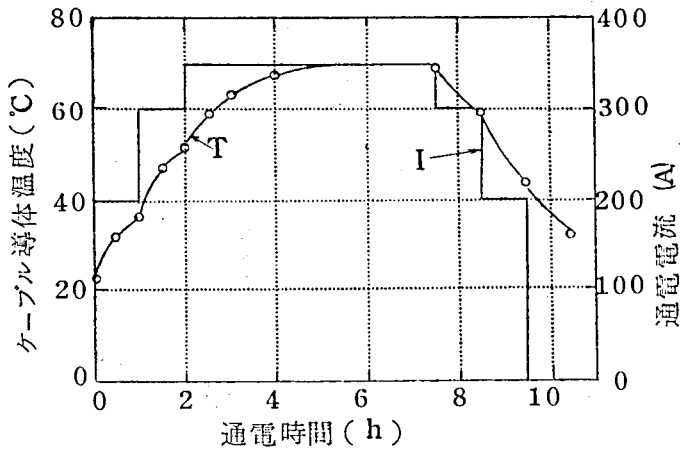


図 2.6.1 実負荷実験中の標準ヒートサイクル

の通電電流ならびに導体温度は図2.6.1に示すようである。ただし、図は周囲温度約20℃のときの実験結果であり、夏季の実験では導体温度は85℃にも達する。

## 6.2.2 垂直布設ケーブルの実験

試料は水平布設のものと同じである。ただし標準油含設のもののみについて実験を行なった。ケーブルは高低差10mのもの2試料，ならびに5mのもの1試料をJ字型に布設した。ケーブルの最下部にはガラス筒を使用した油容器を取付け，流下する油の量を外部から測定できるようにした。ケーブルの端末補強は水平の場合と同じくハイボンテープを使用し，ケーブルヘッド内はガスが入る方式とし，流下する油の供給源を作らないようにした。なおケーブルの高さ方向の特性分布を測定するために，ケーブル長約2.8m毎に遮蔽銅テープを切断し，高低差10mのものでは4分割，5mのものでは2分割して分

割点は鉛被に銅管を鉛工して取付け、こゝから遮蔽銅テープを結ぶ導線を取り出し、誘電正接測定用の主電極とした。 ヒートサイクルは高低差 $10m$ のもの1試料と、 $5m$ のものに、通電して行ない、その場合の通電電流ならびにケーブル温度等の関係は水平布設の場合と同じである。 印加電圧は使用電圧の $12.7kV$ のみとし、昼夜連続で印加した。

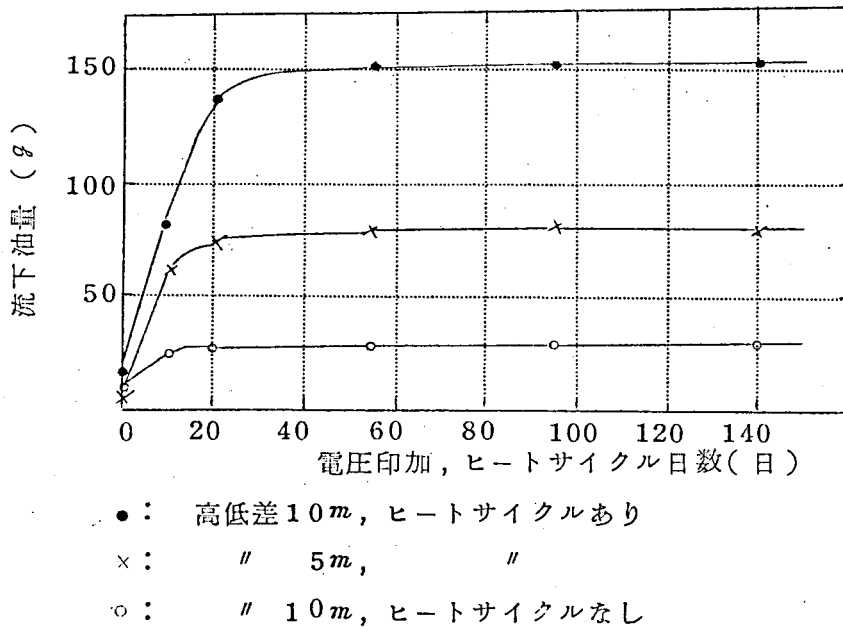


図 2.6.2 垂直布設ケーブルの絶縁油流下特性

### 6.3 実験による考察

#### 6.3.1 絶縁油の流下

垂直布設ケーブルの絶縁油流下特性を図2.6.2に示した。

初期値が零でないのは布設後電圧印加を行なうまでに流下した

油があるためである。常説的な結果であるが、ヒートサイクルのないものは油の流下が少なく、次項に示すように誘電正接特性も良好である。また後に述べる絶縁油流下後の油没率測定結果よりも明らかであるが、図2.6.2の結果からみても、流下油量は十分多く、自己回復作用の有無には関係しないことが推定される。またヒートサイクルのあつたものでは流下油量はケーブル長にほぼ比例しているが、このことはケーブルの脱油が十分行なわれたことを示すものであつてさらに高低差が大きくなつても上部の脱油率がこの実験の場合より多くなるとは考えられない。

### 6.3.2 誘電正接特性の変化

まず水平布設ケーブルについて、標準油含浸の試料の誘電正接電圧特性の初期の値を図2.6.3に示した。高粘度油含浸のものでも類似の特性が得られる。さらにこれらの特性をわかりやすくするために、誘電正接電圧特性から求めたコロナ開始電圧の変動を図2.6.4に、また材質の誘電正接の変動として使用電圧12.7 kVで測定した値を図2.6.5に示した。これらの特性から自己回復作用が有効に起こっていることを知ることができる。すなわち、12.7 kV印加のケーブルでは最初低いコロナ開始電圧が、電圧印加後短時日のうちに印加電圧以上に上昇し、ボイド放電は起こらなくなり、したがつてまた劣化も全然起こらなくなっている。標準油含浸のものについてみれば19.1 kV印加の試料でも実験開始後200日目頃から誘電正接は増加せず、ボイド放電が起こらなくなつたことがわかる。

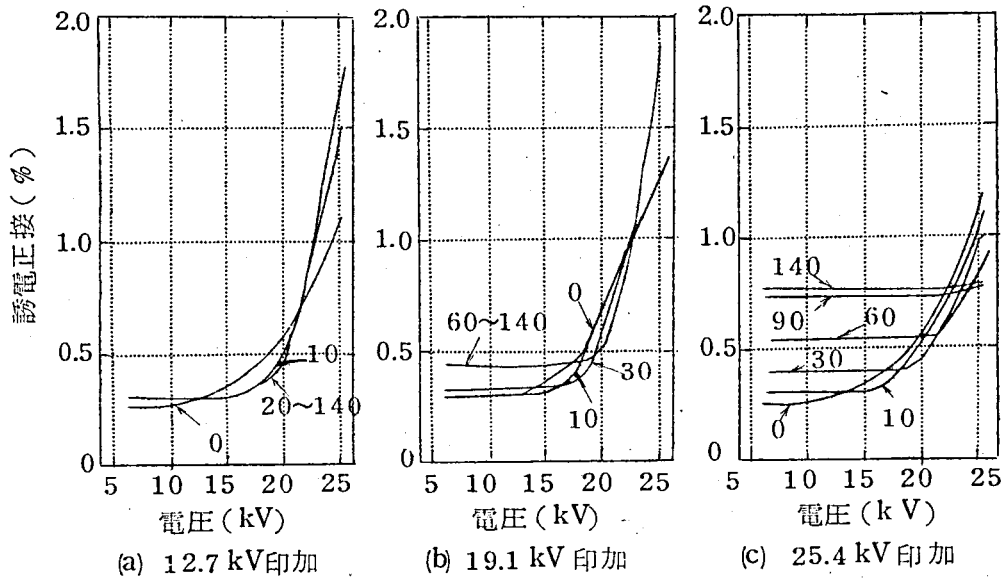
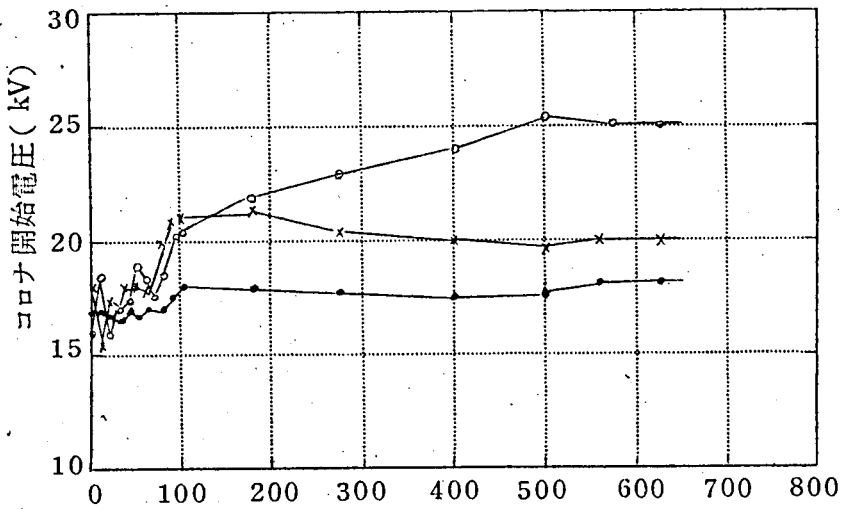
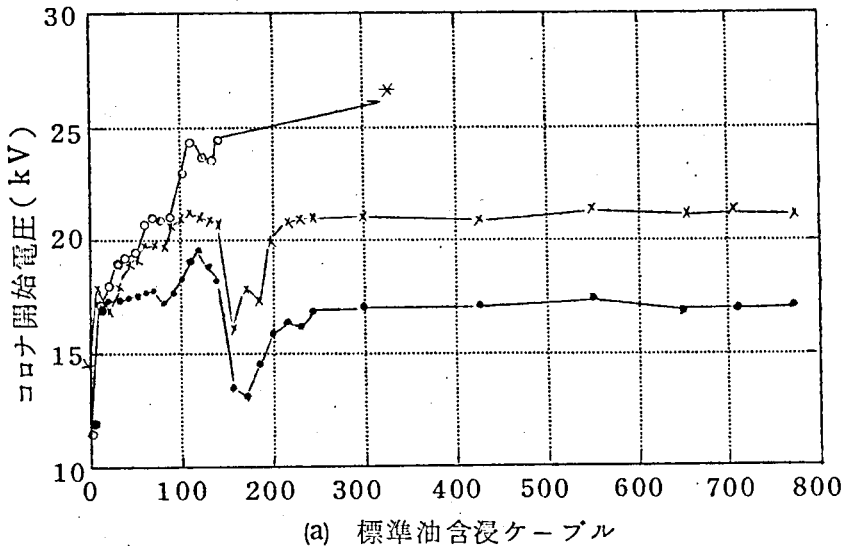


図 2.6.3 水平布設ケーブルの誘電正接電圧特性の変化

注) 図中の数字は実験日数を示す。

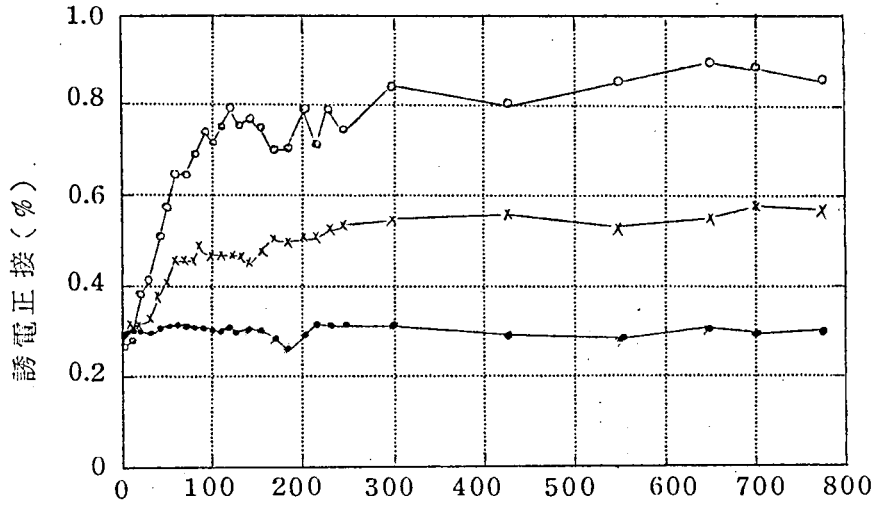
同様に 25.4 kV 印加の試料についてもボイド放電が起らなくなることが推定され、前述のモデル実験で検討した図2.4.15の特性は実ケーブルに換算しても十分安全であることがわかる。高粘度油含浸のものについても同様であるが、この場合にはコロナ開始電圧の上昇がおそく、したがってまた材質自体の誘電正接の増大する速度が大きくなっている。これは含浸油量が等しい場合には高粘度の油の方が移動しにくいためと考えられる。実用的見地からは、後に示すように破壊電圧は両含浸油を使用した試料について差異が少ないことより、決定的な優劣をきめがたいが、誘電正接特性、コロナ開始電圧ならびにそれ



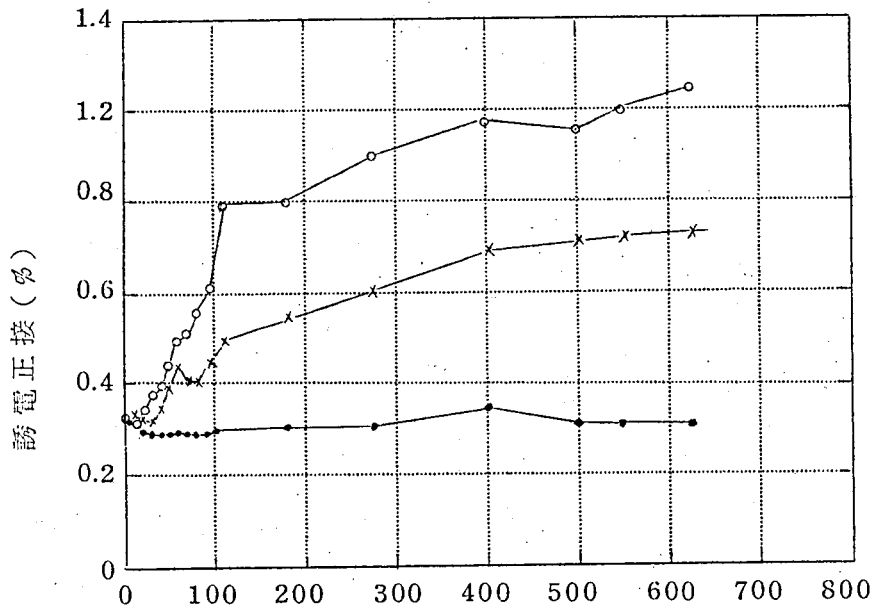
電圧印加日数 (日)(10h/日)  
 ○ : 25.4 kV 印加  
 × : 19.1 kV "  
 ● : 12.7 " "

図 2.6.4 水平布設ケーブルの自己回復作用によるコロナ開始電圧の変動

注) \* 以後 25.4 kV 以上であることを示す。



(a) 標準油含浸ケーブル



(b) 高粘度油含浸ケーブル

○ : 25.4 kV 印加  
 × : 19.1 kV 印加  
 ● : 12.7 kV 印加

電圧印加日数 (日) (10h/日)

図 2.6.5 水平布設ケーブルのコロナ劣化による誘電正接の変動

らの飽和する状態等より、標準油含浸ケーブルの方がすぐれていると結論される。すなわち誘電正接ならびにコロナ開始電圧が完全に飽和することは、その印加電圧でボイド放電が起こらないことを意味し、その後の劣化は起こらないものと考えられる。図2.6.4において標準油含浸ケーブルのコロナ開始電圧がいつたん低下しふたたび上昇しているが、これは特殊現象である。すなわち、遅れて実験を開始した高粘度油含浸ケーブルとガス供給管とを連結するために鉛工を行ない、ケーブルが局部的に加熱され油の移動が起こったためである。しかし、25.4 kV 印加のものでは、このような局部的加熱により何の特性上の変化も示していないが、これはこのときすでかなりのワックス化が進んでいるためにボイドは安定し、油の移動が起こらなかったためと考えられ、これに対し19.1 kV ならびに12.7 kV 印加のものでは、このときまでにボイドに流入した油のワックス化は不完全であつたために油が移動し、コロナ開始電圧が低下したものと考えられる。しかし、一方また実用的な面からは、このように突発的な理由で一時的性能が低下してもふたたび回復することが明らかとなり、この現象も低ガス圧ケーブルのすぐれた自己回復作用を示すものである。

次に垂直布設ケーブルのコロナ開始電圧の変動を図2.6.6に示した。この場合には印加電圧は定格使用電圧の12.7 kV のみであり、最初からコロナ開始電圧以下であるためボイド放電は起こらず、12.7 kV における誘電正接の変動は起こらない。放電が起こりうるボイドの量を示すものとして25.4 kV



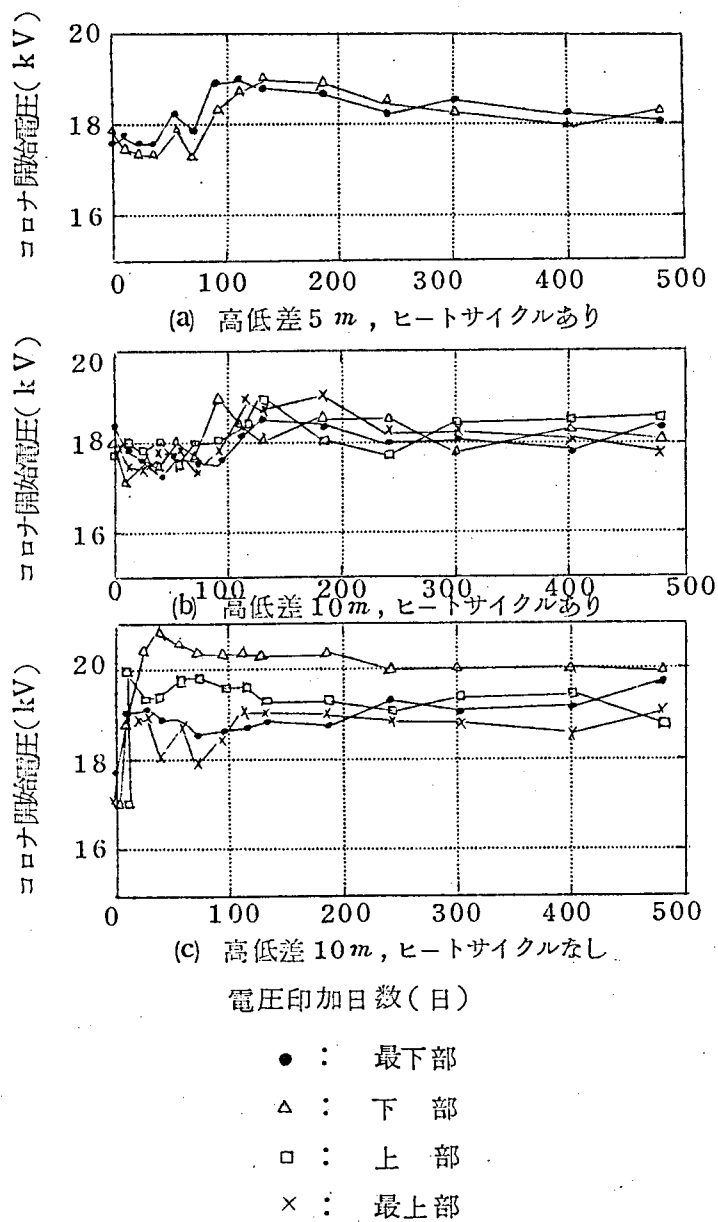
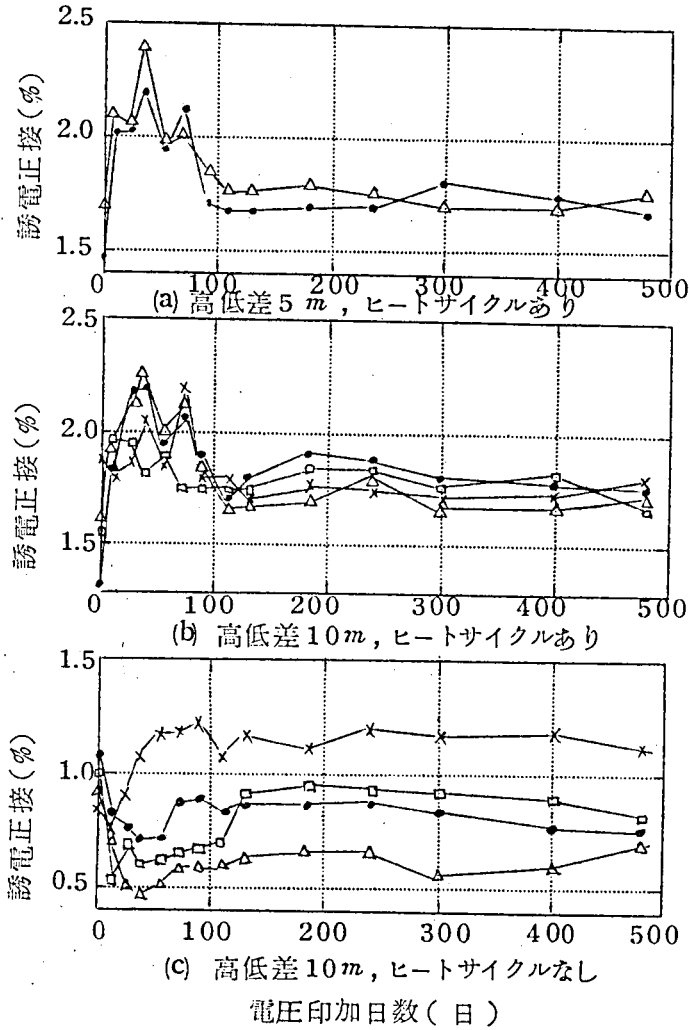


図 2.6.6 垂直布設ケーブルのコロナ開始電圧の変動



- : 最下部
- △ : 下 部
- : 上 部
- × : 最上部

図 2.6.7 垂直布設ケーブルの 25.4 kV における誘電正接の変動

における誘電正接の変動を図2.6.7に示した。顕著な特徴としては、ヒートサイクルが行なわれ、絶縁油の流下がかなりあるにもかかわらず、コロナ開始電圧の低下は起こらず、むしろ上昇する傾向があり、しかもまた上下位置による特性の差異がないことである。ヒートサイクルのなかつたものでは下部の方が特性がよく、常識的な結果であるが、コロナ開始電圧のみみれば、最上部ではヒートサイクルのあつたものと大差なく、実用的性能はヒートサイクルにほとんど関係しないことが考えられる。このように垂直布設で上、下の絶縁特性に差のないことはさらに高低差が大きい場合にも上部の性能が低下しないことを意味しており、低ガス圧ケーブルは数十メートルの高低差のある場合にも異常なく使用できることが推定される。もちろん実際の場合には流下油によるガス通路の閉塞、あるいはまた下部の鉛被に過大な機械力がかかる等のことが考えられ、この点については別途検討を行なう必要がある。

以上の結果より自己回復作用の機構について再考察してみる。すでに述べたように、モデル実験においてはボイドへ油が流入するのはボイド放電の起こることが主原因であることを確認し、それ以外の原因についてはその影響も少なく、はつきりした結論は得られなかつた。筆者はこゝでボイド放電が起こることにより油がボイドに流入し、しかも油がワックス化されてボイドが安定化される作用を積極的な自己回復作用と名づけることとする。実ケーブル試料による実験で、水平布設の場合 19.1 kV ならびに 25.4 kV 印加のもののコロナ開始電圧が上昇す

る作用は、この積極的自己回復作用の典型的なものである。

しかし垂直布設ケーブルでは図2.6.6に示すようにコロナ開始電圧は高く、印加電圧12.7kVではボイド放電が起こるとは考えられないが、この場合にもコロナ開始電圧が17kV以下にならないことは一種の自己回復作用である。しかしその機構は前述のものと別に考えなければならない。すでに述べたように自己回復作用の発見者であるG.B.Shanklinはその機構として、気体と油との誘電率の差により、誘電率の大きい油は高電界部に移動するため、導体近くに生じたボイドには外側から油が流入してくるものと考えている。この説に対してはそのような静電気力が非常に小さいものであるため反対意見も多く、筆者もまた彼の説には反対してきた。こゝで機構を考える上で参考となる実験結果として、N.Klein<sup>(61)</sup>のケーブル油の流下の実験によれば、いつたん含浸したケーブルをつり下げて下部へ油を自由に流下させた場合と、含浸しないケーブルの下端を油中に入れて毛細管現象と表面張力とにより、上部に油を吸い上げた場合とでは定常状態に達してからのケーブルの油量は大きく異なり、前者の方がはるかに多いという結果がある。すなわちわずかの力の存在により、ある程度の量までは油は絶縁紙層に安定に保持されることが明らかである。このことから、本実験のように電圧印加の状態では油の流下量を変えるほどでなくとも電界の作用により油の分布に微妙な差異が生じ、ケーブルのコロナ開始電圧が低下しないと考えることができる。この機構を前の積極的に対し消極的な自己回復作用と名づけよ

う。すなわち、ケーブル絶縁体中で油が重力ならびに熱膨張等により移動するとき、油に働く印加電界による静電気力によつてコロナ開始電圧が低下しないか、もしくは若干上がるような油の分布の生ずることが考えられる。ここで注意すべきことはすでに述べたように、いずれの機構によるものでも自己回復作用の起こつた後のボイドの状態は放電が起こりにくい程度に油、またはワックス化した油で満たされているのみであり、完全に油が充満している状態とは異なるものである。実ケーブルの自己回復作用には以上の2種の機構のものが存在し、その割合はケーブルの使用条件によつて異なる。

### 6.3.3 長時間耐圧試験結果

前節に示すように、コロナ開始電圧ならびに誘電正接特性は飽和したとみなしうる状態に達したので、実負荷実験を中止し試料の長時間耐圧試験を行なつた。破壊電圧を表2.6.1ならびに表2.6.2に、またこれらのケーブルの油浸率測定結果を表2.6.3に示した。

まず、垂直布設ケーブルについてみると、油浸率は極度に小さくなつており、しかも上下に差がない状態である。このことはすでに述べたように、ケーブルの脱油がこの温度では完全に行なわれたことを示すもので、もし布設高低差がこれ以上大きくなつてもケーブルの油浸率はここに示した値より小さくなることは考えられない。通常ソリッドケーブルでは、流下する油を収容する場所は鉛被と絶縁体との間隙に限られるので、このように極端な油の流下は起こらず、もし起こるとすれば下

表 2.6.1 水平布設ケーブルの長時間耐圧試験結果

(70kVより電圧を印加し10kV/3hで段階的に  
昇圧し破壊させる)

No	試料ケーブル		破壊電圧 (kV)	破壊電圧に上昇 後の破壊時間 (h)	破壊時の 鉛被温度 (℃)
	含浸油	実負荷実験時 の印加電圧(kV)			
1	標準油	1 2.7	110	1.57*	60, 58, (65)
2	"	1 9.1	90	1.00	55, (60), 57
3	"	2 5.4	70	0.08, 0.37**	—
4	高粘度油	1 2.7	80	0.04	42, 42, 48
5	"	1 9.1	80	1.17	35, 38, 40
6	"	2 5.4	70	1.04	48, 50, 48

注 (1) No1～3はヒートサイクル，電圧印加は770日，No4～6は620日

(2) ( )内の値は破壊点近くで特に高温となつたものである。

(3) \* 100kV 以上は2時間で昇圧した。

(4) \*\* 1回目は端末で破壊したもので，2回とも50kV, 3時間  
の電圧印加では異常なし。

部において鉛被事故等が起こつた場合のみである。このよう  
に油量が極度に減少しているにもかかわらず，その絶縁耐力の  
低下がわずかであることは，低ガス圧ケーブルのすぐれた特性  
の一つである。たとへば表に示したように，長時間耐圧試験の  
時にはケーブルの温度上昇がかなり大きく，通常の布設状態のま  
ま同様な試験を行なえば，ケーブルの熱放散抵抗が大きいため

表 2.6.2 垂直布設ケーブルの長時間耐圧試験結果  
(試験法は表 2.6.1 と同じ)

No	試料	破壊電圧 (kV)	破壊電圧に上昇後 の破壊時間(h)	破壊時の鉛被 温度(℃)
1	高低差 10m, 上半分	90	1.25	47, 50,
2	" " 下半分	80	0.5	45,
3	" 5m,	100	0.90*	48, 52, (58)

注 (1) ヒートサイクル, 電圧印加日数は 480 日

(2) ( ) 内の値は破壊点近くの温度である

(3) \* 90 kV 以上は 2 時間で昇圧した。またこの試料では導体  
近くにはボイドが存在しないことを確かめている。

に温度上昇が著しく, これより低い電圧で破壊することが考えられる。しかし実際の使用状態で生ずる異常電圧は時間的にはごく短いものであり, それによる温度上昇は問題にならないものである。またコロナ開始電圧特性からも明らかなように, このケーブルでは常時ボイド放電が起こるとは考えられず, したがってこれ以上に絶縁耐力が低下することは考えられない。以上の特性より, このケーブルはさらに大きな高低差のもとでも十分安全に使用することができるものと結論される。

水平布設のケーブルについてみると, 25.4 kV 印加のものでは誘電正接も大きく, またワックス化も著しい。特に標準油含浸のものではワックスが多く, 絶縁最外層までワックス化

表 2.6.3 実負荷実験前後の油浸率測定結果

試料ケーブル			重量 油浸率 (%)
布設状態	含浸油	実負荷実験時の 印加電圧(kV)	
水平	標準油	0	31.4
"	"	12.7	28.7
"	"	19.1	28.8
"	"	25.4	28.6
"	高粘度油	0	30.1
"	"	12.7	27.0
"	"	19.1	29.6
"	"	25.4	28.0
垂直	標準油	0	29.4
{ " 上*	"	12.7	25.8
{ " 中	"	"	26.4
{ " 下	"	"	26.3
" 下**	"	"	27.4
{ " 上***	"	"	26.8
{ " 中	"	"	29.0
{ " 下	"	"	29.3

- 注 (1) \* 高低差10m, ヒートサイクルあり  
 (2) \*\* 高低差5m, ヒートサイクルあり  
 (3) \*\*\* 高低差10m, ヒートサイクルなし  
 (4) 印加電圧 0 のものは実負荷実験前の値である。



して流動する油はほとんど存在しない状態となつている。またテープの突き合せ部にはほぼ完全にワックスが充満しており、自己回復作用が有効に起こつていることが確認された。しかし、絶縁紙層間には油の不足部、すなわち厚さの非常に小さいボイドが存在しており、こゝでは25.4 kV(使用電圧の2倍)程度の電圧を印加したのみでは放電は起こらないが、長時間耐圧試験時には高電圧印加のため当然放電は起こるものである。

その場合ボイド周辺の油はすでにワックス化しており、周囲から流動する油がないために、放電による局部的侵食劣化が起こり、比較的早く破壊に至ることが考えられる。表に示した破壊電圧値がこの種ケーブルの製作時の長耐値100~110 kVに比して低いのはこのためと考えられる。しかし一般に長時間耐圧試験は製作時の性能を判定するために行なわれるものであり、このように使用電圧の2倍の電圧を印加した長期間劣化実験後のケーブルを対象とした場合にはその評価法を変えて考えることが必要である。すなわち供試ケーブルにおいては、自己回復作用のために25.4 kVを印加してもボイド放電は起こらない状態となり、これ以上電圧印加を続けても絶縁の劣化は起こらず、しかもこの特性が飽和に達した状態で絶縁耐力が使用電圧(25.4 kVとしても)よりも十分大きいことを確かめることができたのであるから、このケーブルは実用上非常にすぐれた絶縁特性をもつケーブルであるといふことができる。

以上の結果から現在の標準ケーブルでは2倍の電圧でも異常なく実用できることが示されるが、安全率をみれば1.5倍(最

大電位傾度約  $55\text{kv/mm}$  ) で十分安全に使用できるものと結論される。このことはまた図2.4.15に示したモデル実験の結果とも一致した結論である。ただしこゝで実験したケーブルは、丸導体ケーブルであり、紙巻きが均一に行なわれたことがすぐれた結果の得られた原因でもある。実際の場合には導体寸法が小さい場合を除いては、楕円あるいは扇形導体が使用され、その場合紙巻きの不整が起こることも考えられる。したがって、本研究ではその点についての検討を行なっていないが、製作に当つては機械的強度とも関連し、紙巻き方式ならびに紙巻き張力等の検討を行なうことが必要である。

#### 6.4 総 括

以上述べた実ケーブルについての実験により、さきにモデル実験で得られた結果を再確認し、さらに実用的な立場から低ガス圧ケーブルの自己回復作用の機構ならびにその効果を確認することができた。すなわち、ボイドへ油が流入する機構としてはボイド放電によるものと、放電によらず、温度の変動ならびに重力による油の移動と静電気力との組合せ効果によるものとが存在し、実際には両機構により自己回復作用が起こるものである。次に水平布設の状態では絶縁上の安全率は十分大きく、2倍の電圧で使用しても異状がないことが明らかとなり、また垂直布設においては、機械的な問題は別として、絶縁の安全率からは実用上布設高さに制限がないことが明らかとなり、低ガス圧ケーブルのすぐれた絶縁特性を確認することができた。

## 7. 結 言

以上絶縁を構成する素材のコロナ劣化実験，モデルによる自己回復作用の機構の検討，ならびに実ケーブルによる自己回復作用を中心とした絶縁特性の総合的な検討等により，適当な製作法によつて作られた低ガス圧ケーブルは，きわめてすぐれた絶縁性能をもっていることが明らかとなつた。すなわち，自己回復作用により使用中にコロナ開始電圧は上昇し，劣化の原因となるボイド放電の起こる可能性は極度に少なくなり，しかもその状態に達したときの絶縁耐力は使用電圧に比して十分高く，実用上大きな安全率が存在するものである。ここに本研究で得られた主な結果を要約すると次のようになる。

- (1) 絶縁油が窒素中あるいはまた真空中等でコロナ放電をうけるとワックス化が起こり，電氣的性能の低下には飽和とみなされる状態が存在する。これは実質的には油が液体から固体に変化したことであり，このような状態に達すれば，その後は固体絶縁材料の一般特性として放電による材質的变化は起こらなくなる。しかし通常ケーブル中ではその状態まで変化することは起こらない。
- (2) PO-3000等の合成油は，コロナ放電をうけた場合に，重合反応よりも分解反応が主として起こり，粘度の上昇は起こらないので電氣的性能は低下の一途をたどる。このため単独でガス圧ケーブルの含浸油とすることは不適當であるが，鉱油と混合し増粘度剤として使用する場合にはその欠点は現われず，初期の誘電正接特性ならびに実際にケーブル中でうける放電の量を考えれば，現状では増粘度剤として適當なものであるといふことができる。
- (3) 自己回復作用の機構は，ボイドに油が流入し，ボイド放電が起こ

らなくなることであるが、油の流入はボイド放電によるものが大きい。すなわち放電が起こると油は一種の泡立ち現象により、有効粘度が減少し、放電によつて起こる局部電界により静電気力をうけてボイドに流入するものである。放電が起こらない場合には印加電界からの静電気力のみによる油の移動はほとんど起こらない。また放電により油の蒸気が放電空間中で重合反応を起こしてボイド中に固化集積することも自己回復作用が起こる主要原因の一つである。

- (4) 実ケーブルではボイド放電が起こらない場合にも自己回復作用は起こり、これは重力による油の流下ならびに熱膨張等による油の移動が起こる場合、油の配置がボイド放電の起こりにくい状態となるためであり、実用上この作用の効果も大きい。
- (5) 絶縁紙自体はコロナ放電をうければ劣化しやすいものであるが、油浸紙では油が放電の影響をうけるのみで、紙は油に保護されて劣化はほとんど起こらない。したがつてボイドを含む油浸紙絶縁においては、ボイド放電が起こつても自己回復作用により破壊電圧はかえつて上昇する。ただし実ケーブルでは製作時絶縁内部にはボイドはほとんど存在せず、使用後の破壊電圧が製作時の値より低くなるのは当然である。
- (6) 自己回復作用は、現象としてはガス圧の大小に関係なく起こるが、実用的にその有効性を期待できるのは、ガス圧がゲージ1気圧程度の低ガス圧ケーブルのみである。ガス圧を上昇すればコロナ開始電圧の上昇は大きいが、自己回復作用を期待しうる許容電圧の上昇はそれほど大きくならない。したがつてガス圧が4～5気圧の

中ガス圧ケーブルあるいは10~15気圧の高ガス圧ケーブルではコロナ開始電圧に対し安全率の高い設計とすることが必要である。

- (7) 垂直布設の低ガス圧ケーブルでは、絶縁油の流下は自己回復作用に関係なく起こり、定常状態の油浸率はかなり小さくなる。この場合コロナ開始電圧の低下が起こらないのは、油がボイド放電の起こりにくいような配置となるためである。したがって、現在のケーブルでは、機械的強度の問題は別として、絶縁上の問題からは布設高さに制限をうけず、実際には安全率をみても数十メートルの高低差には異常なく使用することができる。

- (8) 現在の標準の低ガス圧ケーブルは（絶縁定格20kVで、絶縁厚5.1mm）、製作法が適当であれば1.5倍の電圧で使用しても十分安全である。

## 結 論

第1部ならびに第2部に述べた研究結果により、高電圧絶縁中に起こるボイド放電の絶縁性能に及ぼす影響の大要を明らかにし得たものと考えられる。本研究によつて得られた個々の具体的な結論は、各部毎に結言として取りまとめて述べてあるが、特に本研究によつて明らかとなつたことを要約すると次のようになる。

一般にコロナ放電あるいはボイド放電といわれるものも、乾式絶縁と油等の液体を含浸した絶縁とでは、その絶縁性能に及ぼす影響はかなり異なつたものとなる。すなわち固体絶縁材料ではコロナ放電をうけても、その場合の電子ならびにイオンの個々のエネルギーは小さいために材質の内部までの変質は起こらないが、油浸紙等においては、油は放電によつて流動し、常に新しい面が放電をうけるために油には全体としての材質的变化が起こるものである。また乾式絶縁の機器では、通常ボイド内部へは外気の流通する場合が多いが、油浸紙絶縁では外気の直接的な補給はなく、前者のコロナ劣化には酸素が重要な役割を果たすのに対し、後者においては実用的に酸素の影響は重要なものではない。

固体絶縁材料のコロナ劣化の一般的形態は、表面からの均一消耗、それに続く不均一局部侵食孔の進度、ならびに最終過程として侵食孔の先端の電界強度が本質的強度に達して瞬時に破壊する過程の3種の過程に大別され、寿命中の大部分の時間は均一消耗過程でしめられる。この均一消耗の過程は一種の酸化反応であり、侵食孔がのびるに従いその進展に対しては酸素の影響が減少する。また均一消耗から局部的侵食に移行する時期は放電時の表面抵抗によつて大きく変動し、一様な表面抵

抗の低下の起こるものでは侵食孔の進展が遅れ、コロナ劣化による破壊までの寿命は著しく長くなることを確かめている。したがって、コロナ劣化による寿命の低減をできるだけ小さくするには、酸素の遮断等によつて均一消耗の速度を小さくし、しかも局部的侵食孔の生じにくいように表面状態を変化させる処理剤あるいは絶縁方式を選ぶことが基本的な対策であると結論される。一方また、マイカ等を利用できる発電機コイル絶縁等については、現状では樹脂自体の耐コロナ性を考慮するよりも、マイカとの複合絶縁として、マイカのすぐれた耐コロナ性を有効に発揮できるような樹脂の材質ならびに加工法を選ぶことが、耐コロナ性を向上させるための有効な手段であるものと考えられる。

次に油浸紙絶縁に対するボイド放電の影響の一例として、低ガス圧ケーブルの自己回復作用については、本研究によりその機構が解明され、この作用の効果を実用的に期待できることが明らかとなつた。すなわち、自己回復作用によつては、ボイド内にワックスが集積するが、この機構はボイドに放電が起こることにより油がボイドに流入し、そこでワックス化が起こるものであつて、これによりボイド放電は消滅し絶縁性能の安定化が起こる。また広義の自己回復作用としてはボイド放電が起こらなくともヒートサイクルと電圧印加との相剝作用により、コロナ開始電圧が低下しない現象のあることも確かめている。このように自己回復作用が起こつた後の絶縁耐力も初期状態をボイドのある状態とすれば、それよりもかえつて上昇し、また実際のケーブル製作時と比較しても低下率はわずかであり、このケーブルは実用的に十分満足な性能を示すことが明らかとなつた。さらにまたこの作用を期待しうる使用電界強度ならびにガス圧範囲等をも明らかにすることができ、現行のケーブ

ルが20~30kVの系統に使用されるケーブルとして適当なものであることを確かめることができた。

このように本研究はコロナ放電が絶縁特性に及ぼす影響を系統的に研究し、その大筋を明らかにしたものであり、同時にまた実用的立場から高圧絶縁の耐コロナ性を向上させる基本的対策をも明らかにしたものである。

終りに本研究に対し御懇篤なる御指導を賜わった京都大学教授大久保博士に深謝申し上げるとともに、有益な御助言ならびに御討論を賜わった武蔵工大教授鳥山博士、御激励ならびに御指導を賜わった日立製作所日立研究所所長三浦博士、種々御指導をいただいた山口大学牧助教授（前日立研究所部長）、日立研究所橋本部長ならびに井上主任研究員等の方々に深謝申し上げる次第である。



## 参 考 文 献

- (1) 日立 : 実用新案 380,345 385,596 (昭25,26)
- (2) 加子 : 電気学会東京支部大会予稿 130 (昭35-11)
- (3) 加子 : 工業材料 8 №13 57 (昭35-12)
- (4) 堀井 : 電試彙報 22 №5 54 (昭33-5)
- (5) 堀井 : 電学誌 80 №856 59 (昭35-1)
- (6) J.H.Mason : P.I.E.E. 98 Pt I 44 (1951)
- (7) D.W.Kitchin : E.E. 218 (1958)
- (8) P.R.Howard : P.I.E.E. 98 Pt II 365 (1951)
- (9) D.M.Robinson : J.I.E.E. 77 90 (1935)
- (10) 岡本 : 電学誌 80 №858 379 (昭35-3)
- (11) A.Gemant : "Liquid Dielectrics" chapV,Wiley,  
NewYork (1933)
- (12) T.Rummel : Wiss. Veröff. Siemens. 19 278 (1940)
- (13) 原,平林 : 電学誌 80 №865, 1454 (昭35-10)
- (14) J.H.Mason : P.I.E.E. 102 Pt C 254 (1955)
- (15) 加子 : 日立評論 42 №6 646 (昭35-6)
- (16) 加子 : 電気絶縁物の耐コロナ性シンポジウム予稿,電気学会放  
電専門委員会 P62 (昭34-10)
- (17) I.E.C. : T.C.15 (France) 4, proposals from the French  
Committee for an ionization test of insulating  
materials (1954)

- (18) C.N. Ross, E.B. Curdts : Tr. A. I. E. E. 75 Pt III 63 (1956)
- (19) 豊田, 坂田, : 電気四学会連大予稿 543 (昭35-7)
- (20) E. J. McMahon, D. E. Maloney, J. R. Perkins : A I E E. Paper 58-981 (1958)
- (21) 原, 平林 : 電気四学会連大予稿 115 (昭35-7)
- (22) 回転機絶縁試験法委員会編 ; “発電機線輪絶縁試験法” 第6章  
電気書院 (昭33)
- (23) 堀井, 百武, 原, 井関, 井上, 増田, 岡本, ; 電気四学会連大予稿  
101 (昭35-7)
- (24) T. C. Manley ; Trans. Electro Chem. Soc. 84 837 (1943)
- (25) 池田, 堀井, 森田 ; 電試彙報 18 №6 423 (昭29-6)
- (26) 藤, 竹村 ; 電試彙報 14 №5 283 (昭25-5)
- (27) 鈴木 ; 電気化学 24 207 (昭31-5)
- (28) 福田 ; “電気回路” P 69 河出書房 (昭18)
- (29) A. E. W. Austen, W. Hackett ; J. I. E. E. 91 Pt 1 298  
(1944)
- (30) 百武 ; 電学誌 80 №858 376 (昭35-3)
- (31) 犬石, D. A. Power ; 電学誌 77 №827 1072 (昭32-8)
- (32) 下山田, 阿部 ; 日立評論 42 №5 580 (昭35-5)
- (33) M. Dole, C. D. Keeling, D. G. Rose ; J. A. C. S. 76 (3) 4304  
(1954)
- (34) 井関, 松下 ; 電気学会東京支部大会予稿 71 (昭33-10)
- (35) 井上 ; 東京工大学報A-2 (昭32)
- (36) J. C. Devins, M. Burton ; J. A. C. S. 76 (2) 2618 (1954)

- (37) T.W.Dakin, H.M.Philofsky, W.C.Divens ; Tr.A.I.E.E.  
73 Pt I 155 (1954)
- (38) G.D.Cooper, MProber ; J.Polymer Science XLIV  
397 (1960)
- (39) C.E.Mercier, W.F.Elliott ; Elect.Manuf. 60 №5 140  
(1957)
- (40) A.M.Thomas ; J.I.E.E. 91 Pt II 549 (1944)
- (41) 竹村, 杉田 ; 電試集報 15 №1 30 (26-1)
- (42) 電気学会有機材料劣化専門委員会編 ; "高分子材料の劣化" 第  
2, 3章 (昭33)
- (43) J.H.Mason ; "Progress in Dielectrics" Edited  
by J.B.Birks & J.H.Schuman, chap 1, Heywood (1958)
- (44) R.Davis, A.E.W.Austen ; P.I.E.E. 94 Pt III 154  
(1947)
- (45) E.C.Rogers : P.I.E.E. 105 PtA 621 (1958)
- (46) S.I.Reynolds : Tr.A.I.E.E. 77 Pt III 1604 (1958)
- (47) S.Whithead : "Dielectric Breakdown of Solids"  
Chap IV, Clalendon Oxford (1951)
- (48) K.Wenzel : プラスチックス 7 №2 1 (昭31-2)
- (49) 加子 : 電気四学会連大予稿 535 (昭35-7)
- (50) 斉藤, 山中, 日野 : 電学誌 77 №831 1610 (昭32-12)
- (51) R.W.Christy : J.Appl.Phys. 31 №9 1680 (1960)
- (52) B.Kovaliv, E.Briner : Helv.Chim Acta 36 275.  
(1953), 放電ハンドブック 電気学会放電専門委員会編 P126  
(昭33)

- (53) G.Busz, W.Finkelburg : Z.phys. 139 212 (1954)
- (54) 広田 : " 反応速度 " 第 1 章 共立全書 ( 昭 32 )
- (55) 堀井 : 電学誌 80 №858 357 ( 昭 35-3 )
- (56) J.H.Mason : ERAREport L/T379 ( 1958 )
- (57) K.Sugita, S.Nagao, Y.Toriyama : Brit. J. Appl. phys.  
7 38 ( 1956 )
- (58) 堀井 : 電試彙報 21 №4 241 ( 昭 32-4 )
- (59) 堀内, 塚田, 熊田, ; 電気四学会連大予稿 497 ( 昭 35-7 )
- (60) 依田 : 電気絶縁物の耐コロナ性シンポジウム, 電気学会放電専門委員会, P 103 ( 昭 34-10 )
- (61) T.E.Allibone, J.M.Meek : J.S.I. 21 21 ( 1944 )
- (62) 加子 : 日立評論別冊 28 33 ( 昭 33-12 )
- (63) G.B.Shanklin : Tr. A. I. E. E. 63 549 ( 1944 )
- (64) In. M. Volkobinski : Soviet Phys. Tech. Phys. 1 3 ( 1953 )
- (65) H. Becker : Wiss. Veröff. Siemens. 8 199 ( 1929 )
- (66) 山田 : " 電気絶縁油 " 第 16 章 昭晃堂 ( 昭 27 )
- (67) C.T.Hatcher : C. I. G. R. E. №219, ( 1952 )
- (68) C.L.Thomas, G.Egloff, J.C.Morrell : Chem. Rev. 28 1  
( 1941 )
- (69) C.W.Nederbragt : J. I. E. E. 79 282 ( 1936 )
- (70) J.D.Piper : " Dielectric Materials and Applications ",  
Edited by A.R.von Hippel chap III Wiley ( 1954 )
- (71) J.Sticher, J.D.Piper : Ind. Eng. Chem. 33 1567 ( 1941 )
- (72) L.P.Lankin : U. S. Patent 2,086,434 ( 1937 )

- (73) H. Basseches, D. A. McLean : Ind. Eng. Chem. 47 1782  
(1955)
- (74) 加子 : 日立評論 別冊 21 26 (昭32-12)
- (75) A. P. Altshuller : J. Phys. Chem. 58 544 (1954)
- (76) 加子 : 電気四学会連大予稿 671 (昭33-5)
- (77) G. B. Shanklin : Tr. A. I. E. E. 61 719 (1942)
- (78) T. W. Liao, J. R. Nye, H. H. Brustle, J. G. Anderson Tr.  
A. I. E. E. 74 Pt III 1046 (1955)
- (79) 加子 : 電気四学会連大予稿 617 (昭34-4)
- (80) W. A. DelMar : Tr. A. I. E. E. 63 1402 (1944)
- (81) N. Klein : C. I. G. R. E. №213 (1952)